



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUADERNO DE EJERCICIOS DE TERMINACIÓN
DE POZOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
**INGRID DEVORA ALMEIDA
GARCÍA**



MÉXICO D.F.

JUNIO DEL 2005

m. 345564



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Doy gracias a Dios por haberme puesto en este camino y permitirme llegar con éxito hasta el final.

Antes de la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Almeida García
Ingrid Devora
FECHA: 20/JUNIO/05
FIRMA: Almeida G.

A mis padres Ma. Luisa y Javier por que con su ejemplo me han inspirado a salir siempre adelante y por que gracias a sus sacrificios, a su trabajo y a su esfuerzo diario tuve la oportunidad de superarme y alcanzar esta meta.

A mis hermanos: Jonathan y David les dedico este trabajo con mucho amor por el cariño y apoyo que siempre me han brindado.

A mi sobrina Regina por que quiso bajar del cielo para formar parte de mi familia.

A mi abuelita Maria de la Luz y a mi abuelo Jesús por que siempre han sido un apoyo fundamental para mi familia.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México
por abrirme sus puertas y dejarme formar
parte de esta gran casa de estudios.*

*A la Facultad de Ingeniería por
haberme dado la formación y los
conocimientos que contribuyeron en mi
desarrollo profesional con una amplia
visión de superación, pero sobre todo
con un gran compromiso con la
sociedad y la nación.*

*Agradezco especialmente al
Ingeniero Martín Terrazas Romero por
brindarme su apoyo y sus conocimientos
para el desarrollo de esta tesis.*

*También agradezco a mi
director de tesis el Ingeniero M. C.
Jaime Ortiz Ramírez y a mis sinodales:*

*Ing. Manuel Villamar Viguera
M. I. Mario Becerra Zepeda
M. C. José Manuel Reyes Aguirre
Ing. Rafael Viñas Rodríguez*

*Y a todos aquellos que no nombro, pero
que son fundamentales en mi vida y que
sin su ayuda no hubiera podido lograr
cumplir este objetivo.*

*Cualesquiera que hayan sido nuestros logros,
alguien nos ayudo siempre a alcanzarlos.*

Althea Gibson

*Nunca hay viento favorable para
el que no sabe hacia donde va*

Séneca



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-303

SRITA. INGRID DEVORA ALMEIDA GARCÍA

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. en C. Jaime Ortiz Ramírez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

CUADERNO DE EJERCICIOS DE TERMINACIÓN DE POZOS

- INTRODUCCIÓN
- I DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS APLICADAS A LAS TUBERÍAS**
- II DETERMINACIÓN DEL CAMBIO DE LONGITUD DEL APAREJO DE PRODUCCIÓN**
- III FUERZAS TÉRMICAS APLICADAS A LAS TUBERÍAS**
- IV DISEÑO DE APAREJOS DE PRODUCCIÓN**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

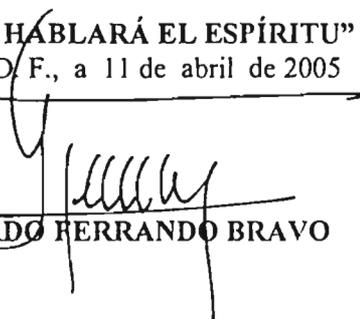
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 11 de abril de 2005
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GRB*JAGC*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“CUADERNO DE EJERCICIOS DE TERMINACIÓN DE POZOS”

TESIS PRESENTADA POR:

ALMEIDA GARCÍA INGRID DEVORA

DIRIGIDA POR:

M. C. JAIME ORTIZ RAMIREZ

JURADO DEL EXAMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS

VOCAL: M. C. JAIME ORTIZ RAMÍREZ

SECRETARIO: M. I. MARIO BECERRA ZEPEDA

1ER. SUPLENTE: M. C. JOSÉ MANUEL REYES AGUIRRE

2DO. SUPLENTE: ING. RAFAEL VIÑAS RODRÍGUEZ

Mayo 05

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Objetivo	2
Capítulo I. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS APLICADAS A LAS TUBERÍAS	4
1. Fuerzas Aplicadas a las Tuberías	5
1.1 Presiones y fuerzas de diseño de las tuberías	5
1.1.1 <i>Estallamiento</i>	6
1.1.2 <i>Tensión</i>	13
1.1.3 <i>Presión de colapso</i>	19
1.2 Presiones y fuerzas internas y externas	27
2. Determinación del Esfuerzo Triaxial	36
3. Determinación de la Elipse de Esfuerzos Triaxiales	44
4. Determinación Gráfica de la Resistencia de las Tuberías por Criterio Triaxial	52
5. Ejercicios Propuestos	55
Capítulo II. DETERMINACIÓN DEL CAMBIO DE LONGITUD DEL APAREJO DE PRODUCCIÓN	57
1. Determinación del Efecto de Pistoneo	58
2. Determinación del Efecto de Baloneo	66
3. Determinación del Efecto de Buckling	72
4. Diámetro de Paso de Herramientas Bajo Efecto de Buckling	81
5. Efectos Combinados	85
6. Ejercicios Propuestos	94

Capítulo III. FUERZAS TÉRMICAS APLICADAS A LAS TUBERÍAS	96
1. Efecto de Temperatura en Tuberías de Producción	97
2. Efecto de Temperatura en Aparejos de Producción	104
3. Ejercicios Propuestos	114
Capítulo IV. DISEÑO DE APAREJOS DE PRODUCCIÓN	116
1. Aparejos con Libre Movimiento	117
2. Aparejos con Movimiento Limitado	140
3. Diseño del Aparejo de Producción	162
4. Ejercicios Propuestos	176
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	178
BIBLIOGRAFÍA	181
NOMENCLATURA Y CONVERSIONES	183

INTRODUCCIÓN

Introducción

En esta tesis se presentan los elementos conceptuales en los que se basa el diseño de las tuberías de revestimiento y producción utilizadas en los pozos petroleros, con la finalidad de lograr resultados satisfactorios tanto en el aspecto técnico como en el económico.

El costo de las tuberías, representan un alto porcentaje de la inversión total del pozo, se tienen estimaciones de que varía del 15 al 30%. Por lo que se deben definir y optimizar los tubulares que deben utilizarse en un pozo.

El diseño de un pozo requiere la aplicación y conocimiento de una diversidad de técnicas y procedimientos, que bien aplicados conducen a definir la resistencia de la tubería ante la imposición de diferentes cargas y esfuerzos.

Básicamente el diseño de tuberías se fundamenta en dos factores principales: el conocimiento del material (capacidad de resistencia) y el conocimiento de las condiciones de esfuerzos (cargas) a los que van a estar sujetas la tuberías. El primer factor abarca desde su fabricación hasta el desempeño mecánico y es la base para reconocer la capacidad de una tubería. El segundo factor significa el conocimiento teórico y experimental necesario para ser capaces de predecir las condiciones de trabajo o de carga que se presentarán en un pozo y en consecuencia que soporte una tubería.

Las tuberías deben estar condicionadas a su capacidad de flujo y a las condiciones de operación de un fluido circulando a través de ella. Para ello, se debe realizar un análisis de flujo para determinar la mejor opción en cuanto a diámetro de tubería, que garantice y mantenga un desempeño eficiente en condiciones de flujo.

Por otro lado y lo cual es materia de esta tesis, se hace referencia al diseño mecánico en base al cual se analiza el desempeño mecánico de una tubería ante la imposición de diferentes cargas.

El diseño mecánico del pozo nos permite determinar la capacidad de resistencia de la tubería a cualquier condición de presión o esfuerzo que se le imponga durante las operaciones de terminación.

El primer capítulo de esta tesis está enfocado a la capacidad de resistencia de las tuberías ante la imposición de diferentes cargas causadas por los fluidos dentro y fuera de la tubería y por el efecto del flujo de fluidos durante las operaciones de terminación tales como: inducción, estimulación, producción, así como por el propio peso de la tubería.

El segundo y tercer capítulo están enfocados al análisis de la carga axial adicional (tensional o compresional) que provoca un acortamiento o elongación en el aparejo de producción, producto de las operaciones de terminación.

Finalmente el cuarto capítulo se basa en el diseño de los aparejos de producción considerando el tipo de empacador, las operaciones en las que ocurre el máximo movimiento de la tubería y la fuerza que resulta de la operación que se haya realizado.

Objetivo

Esta tesis tiene como propósito el análisis y desarrollo de una serie de ejercicios que cubren el el Capítulo Dos y Tres del temario de la asignatura de Terminación y Reparación de Pozos que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el Capítulo Dos está relacionado con la “Determinación de las Fuerzas Aplicadas y sus Efectos a la Tubería de Explotación y Producción” y el Capítulo Tres con el “Diseño de Aparejos de Producción”, todo ello con la

finalidad de contar con una fuente alterna de información tanto para los alumnos, como para los profesores y las personas que estén interesadas en aprender algunos conceptos fundamentales para el diseño de tuberías y aparejos de producción.

100

100

CAPÍTULO

I

Determinación de las Fuerzas Aplicadas a las Tuberías

1. Fuerzas Aplicadas a las Tuberías

1.1 Presiones y fuerzas de diseño de las tuberías

Todos los pozos que se perforan con la finalidad de producir aceite y/o gas o de inyectar fluidos al yacimiento, deben ser revestidos con material suficientemente fuerte para que puedan cumplir su objetivo adecuadamente.

Las tuberías de revestimiento (T. R.) constituyen el medio con el cual se reviste el agujero que se va perforando. El objetivo de las tuberías de revestimiento es proteger las zonas perforadas y aislar las zonas problemáticas que se presentan durante la perforación, además de que es necesaria para mantener la estabilidad del agujero, prevenir la contaminación de la formación y controlar la presión del pozo durante la perforación y en la vida productiva del pozo. También proporcionan el medio para instalar las conexiones superficiales, los empacadores y las tuberías de producción. El costo de la T. R. es significativo ya que es el mayor componente estructural de un pozo y representa el 30% de la inversión.

La tubería de producción (T. P.) es el medio por el cual el aceite y el gas fluyen desde el yacimiento hasta la superficie. Ésta debe ser lo suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos y las presiones asociadas a la producción y a los trabajos que se realicen a lo largo de la vida del pozo. El diámetro de la T. P. debe ser el adecuado para soportar los gastos de aceite y gas que se produzcan. Si la T. P. es muy pequeña restringirá la producción; si es muy grande, tendrá un mayor impacto económico, además de que influye directamente en el diseño total del pozo.

Por lo anterior, el diseño de las tuberías de revestimiento y de producción requiere de un análisis cuidadoso para lograr resultados satisfactorios tanto en el aspecto técnico como en el económico. De no cumplirse con esto, el diseño puede resultar muy costoso, puede ser inadecuado para el pozo y consecuentemente puede tener problemas en el futuro.

En la elaboración del diseño de las tuberías, se deben considerar los trabajos y esfuerzos a los que estará sometida la tubería para determinar su resistencia.

La resistencia de un tubo se puede definir como una reacción natural que opone el material ante la imposición de una carga, a fin de evitar o alcanzar los niveles de una falla.

El término "falla" se entiende como sinónimo de "fractura". Sin embargo, en el estudio de la mecánica de materiales este no es el significado usual del término. Se dice que ocurre una falla cuando un miembro cesa de realizar satisfactoriamente la función para lo cual estaba destinado. En el caso de las tuberías colocadas en un pozo, si estas alcanzan cualquier nivel de deformación se debe entender la situación como condición de falla.

Por lo tanto, una falla en las tuberías es una condición mecánica que refleja la falta de resistencia del material ante la situación y exposición de una carga. Con ello propicia la deformación del tubo.

La importancia de reconocer la capacidad de resistencia de las tuberías ha sido materia de muchas y fuertes discusiones, de extensos estudios y de diversidad de pruebas de laboratorio, que han permitido evolucionar en el conocimiento del comportamiento mecánico de las tuberías. Es por ello que el Instituto Americano del Petróleo (API) ha establecido normas para la fabricación de productos que se emplean en la industria del petróleo. En las normas API, los diámetros nominales de las T. P.'s son del rango de 1.0 a 4.5 pulgadas, y los diámetros de las T. R.'s son del rango de 4.5 a 20.0 pulgadas. Las especificaciones que rigen a los productos tubulares son las 5A, 5AC, y 5AX, que establecen el grado de la tubería, el peso por unidad de longitud, el rango de la tubería (R1, R2 o R3), el diámetro exterior (D), el diámetro de trabajo (drift), el espesor del tubo y el tipo de conexión del tubo.

GRADO: El grado de la tubería nos define el esfuerzo de cedencia de la tubería, el cual consiste en una letra seguida de un número. La letra designada por el API fue seleccionada arbitrariamente para proporcionar una asignación única para cada grado de acero que fue adoptada como estándar. el número de la asignación representa el mínimo esfuerzo de cedencia del acero en miles de libras por pulgada cuadrada (lb/pg²), y es el valor nominal que debe considerarse en todos los cálculos de evaluación de resistencia de las tuberías. Por ejemplo una tubería de revestimiento de grado de acero N-80, tiene un esfuerzo mínimo de cedencia de 80.000 (lb/pg²).

El esfuerzo de cedencia definido por el API es el esfuerzo de tensión mínimo requerido para producir una elongación de 0.5% de la longitud. Este valor de deformación es ligeramente superior al límite elástico. Para tuberías de grado P-110 y Q-125 el API considera una deformación del 0.65% para establecer la cedencia de estos materiales.

PESO: El peso de la tubería es el correspondiente a la unidad de longitud ya sea en kg/m o en lb/pie.

RANGO: El rango es un valor aproximado de la longitud de la sección de una tubería (m o pies). Hay diferentes rangos de longitud:

Tubería de revestimiento:

R1	4.88 m a 7.62 m
R2	7.63 m a 10.36 m
R3	34 m en adelante

Tubería de producción:

R1	6 m a 7.31 m
R2	8.5 m a 9.7 m

DIÁMETRO: Se consideran dos tipos de diámetros, el diámetro externo (D) y el diámetro interno (d) de la tubería en pulgadas.

Las principales fallas de las tuberías son básicamente *colapso, tensión, y estallamiento*.

1.1.1 Estallamiento ¹

La falla por estallamiento se genera cuando la tubería esta expuesta a una presión interna mayor que la resistencia que opone el cuerpo del tubo al estallamiento.

El API ² estableció que la presión interna mínima que resiste una tubería antes de fallar, está en función del diámetro exterior, del esfuerzo de cedencia, del espesor del tubo y del mínimo espesor permisible en el cuerpo del tubo (87.5% del espesor nominal) ³. Es decir:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_x t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

P_i: Mínima presión interna requerida para causar una deformación permanente (lb/pg²)

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

Y_x: Esfuerzo de cedencia (lb/pg²)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D-d}{2}$$

Ejercicio N° 1

Determinar la resistencia a la *presión interna* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y _s)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb/pie	(pg)
2 3/8	N	80	4.6	1.995

Solución:

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$Pi = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_s: Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{2.375-1.995}{2} = 0.19(pg)$$

Sustituyendo en (1):

$$Pi = 0.875 \left(\frac{2 * 80,000 * 0.19}{2.375} \right) = 11,200 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la presión interna de 11,200 (lb/pg²).

Ejercicio N° 2

Determinar la resistencia a la *presión interna* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y _s)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pie}	(pg)
2 7/8	P	105	6.4	2.441

Solución:

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_s : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado P-105 tiene un esfuerzo de cedencia de 105,000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{2.875 - 2.441}{2} = 0.217(pg)$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 105,000 * 0.217}{2.875} \right) = 13,869.13 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La tubería P-105 tiene una resistencia a la presión interna de 13,869.13 (lb/pg²).

Ejercicio N° 3⁴

Determinar la resistencia a la *presión interna* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_s) 1000 (lb/pg ²)	peso Lb _{pic}	Diámetro Interno (d) (pg)
3 1/2	N	80	9.2	2.992

Solución:

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_s : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{3.5 - 2.992}{2} = 0.254(pg)$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 80,000 * 0.254}{3.5} \right) = 10,160 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la presión interna de 10,160 (lb/pg²).

Ejercicio N° 4

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la presión interna de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y _s) 1000 (lb/pg ²)	peso Lb _{pie}
2 3/8	N	80	5.8

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(D^2 - d^2) * h \quad [lt]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$1 \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de acero (lt)

Calculando el volumen de acero suponiendo un pie de tubería:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{5.8(lb) * 453.5(g/lb)}{7.85(g/cm^3)} = 335 [cm^3] = 0.335 [lt]$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$) y la masa en gramos ($1[lb]=453.5 \text{ [gr]}$)

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{2.375^2 - \frac{0.335}{0.5067 * 0.3048}} = 1.8632 [pg]$$

El diámetro interno de la tubería N-80 2 3/8" es de 1.8632 (pg)

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$Pi = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_r : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80.000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{2.375 - 1.8632}{2} = 0.2559(\text{pg})$$

Sustituyendo en (2):

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 80000 * 0.2559}{2.375} \right) = 15,084.63 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la presión interna de 15,084.63 (lb/pg²).

Ejercicio N° 5 ⁴

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la *presión interna* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_r)	peso
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pie}
3 1/2	C	75	12.7

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(D^2 - d^2) * h \quad [lt]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$1 \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de acero (lt)

Calculando el volumen de acero suponiendo un pie de tubería:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{12.7(\text{lb}) * 453.5(\text{g/lb})}{7.85(\text{g/cm}^3)} = 733.6[\text{cm}^3] = 0.7336(\text{lt})$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$) y la masa en gramos ($1[\text{lb}]=453.5 \text{ [gr]}$)

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{3.5^2 - \frac{0.7336}{0.5067 * 0.3048}} = 2.7386 [pg]$$

El diámetro interno de la tubería C-75 3 1/2" es de 2.7386 (pg)

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$Pi = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_s : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado C-75 tiene un esfuerzo de cedencia de 75,000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{3.5 - 2.7386}{2} = 0.3807 (pg)$$

Sustituyendo en (2):

$$Pi = 0.875 \left(\frac{2 * 75000 * 0.3807}{3.5} \right) = 14,276.25 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La tubería C-75 tiene una resistencia a la presión interna de 14,276.25 (lb/pg²).

Ejercicio N° 6⁴

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la *presión interna* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_s)	peso
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pie}
3 1/2	C	75	9.2

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(D^2 - d^2) * h [lt]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$l \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de la columna (lt)

Calculando el volumen de acero suponiendo un pie de tubería:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{9.2(\text{lb}) * 453.5(\text{g/lb})}{7.85(\text{g/cm}^3)} = 531.49(\text{cm}^3) = 0.53149(\text{lt})$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85$ [gr/cm³]) y la masa en gramos (1[lb]=453.5 [gr])

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{3.5^2 - \frac{0.5314}{0.5067 * 0.3048}} = 2.968[\text{pg}]$$

El diámetro interno de la tubería C-75 3 1/2" es de 2.968 (pg)

Calculando la resistencia a la presión interna:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_x t}{D} \right) \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado C-75 tiene un esfuerzo de cedencia de 75,000 (lb/pg²)

t: Espesor

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{3.5 - 2.968}{2} = 0.266(\text{pg})$$

Sustituyendo en (2):

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 75000 * 0.266}{3.5} \right) = 9,975 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La tubería C-75 tiene una resistencia a la presión interna de 9,975 (lb/pg²).

1.1.2 Tensión ¹

Cuando la tubería de revestimiento esta expuesta a una fuerza de tensión mucho mayor que la que resiste el grado de acero, la tubería sufrirá una deformación permanente.

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre de una tubería (Fig. 1), la fuerza de tensión mínima para causar una deformación permanente de la tubería es igual al área transversal (A_s) de la tubería por el esfuerzo de cedencia de la tubería (Y_x).

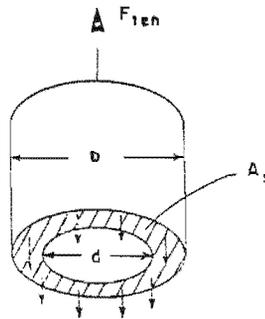


Fig. 1 Diagrama del cuerpo libre de una tubería

Por lo que la tensión mínima necesaria para causar una deformación permanente en la tubería está dada por: ⁵

$$T = A_s * Y_x$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [lb_{fuerza}]$$

donde:

T: Tensión mínima necesaria para causar una deformación permanente en la tubería (lb_{fuerza})

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia (lb/pg^2)

Ejercicio N° 7 ⁴

Determinar la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_x)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg^2)	lb_{pie}	(pg)
2 3/8	P	105	4.6	1.995

Solución:

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [lb_{fuerza}] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado P-105, tiene un esfuerzo de cedencia de 105,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (1):

$$T = \frac{\pi}{4} * 105000 * (2.375^2 - 1.995^2) = 136,944 [lb]$$

La tubería P-105 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 136,944 (lb).

Ejercicio N° 8

Determinar la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_x)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	lb _{pie}	(pg)
2 7/8	N	80	8.6	2.259

Solución:

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [lb_{fuerza}] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (1):

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (2.875^2 - 2.259^2) = 198,708.5 [lb]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 198,708.5 (lb).

Ejercicio N° 9

Determinar la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_x)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	lb _{pie}	(pg)
5	TRC	95	18	4.276

Solución:

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_r (D^2 - d^2) [lb_{fuerza}] \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_r : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado TRC-95 tiene un esfuerzo de cedencia de 95,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (1):

$$T = \frac{\pi}{4} * 95000 * (5^2 - 4.276^2) = 501.086.6 [lb]$$

La tubería TRC-95 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 501,086.6 (lb).

Ejercicio N° 10

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_r) (lb/pg ²)	peso (lb _{pie})
5 ½	N	80	23

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(D^2 - d^2) * h \quad [lt]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$1 \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de la columna (lt)

Calculando el volumen de acero suponiendo un pie de tubería:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{23(\text{lb}) * 453.5(\text{g/lb})}{7.85(\text{g/cm}^3)} = 1328.7(\text{cm}^3) = 1.328(\text{lt})$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85$ [gr/cm³]) y la masa en gramos (1[lb]=453.5 [gr])

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{5.5^2 - \frac{1.328}{0.5067 * 0.3048}} = 4.65[\text{pg}]$$

El diámetro interno de la tubería N-80 5 1/2" es de 4.65 (pg)

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [\text{lb}_{\text{fuerza}}] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x: Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (2):

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (5.5^2 - 4.65^2) = 542,081.81[\text{lb}]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 542,081.81 (lb).

Ejercicio N° 11

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y _x) 1000 (lb/pg ²)	peso lb _{pie}
7	N	80	23

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(D^2 - d^2) * h \quad [\text{lt}]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$1 \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de la columna (lt)

Calculando el volumen de acero suponiendo un pie de tubería:

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{23(\text{lb}) * 453.5(\text{g/lb})}{7.85(\text{g/cm}^3)} = 1328.7(\text{cm}^3) = 1.328(\text{lt})$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$) y la masa en gramos ($1[\text{lb}]=453.5 \text{ [gr]}$)

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{7^2 - \frac{1.328}{0.5067 * 0.3048}} = 6.356[\text{pg}]$$

El diámetro interno de la tubería N-80 7" es de 6.356 (pg)

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [\text{lb}_{\text{fuerza}}] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (2):

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (7^2 - 6.356^2) = 540,433.3[\text{lb}]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 540,433.3 (lb).

Ejercicio N° 12⁴

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la fuerza de *tensión* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Esfuerzo de cedencia (Y_x)	peso
(pg)		1000 (lb/pg ²)	lb _{pie}
7	N	80	26

Solución:

Calculando el diámetro interno (d):

Para determinar el diámetro interno de la tubería utilizamos la fórmula para calcular el volumen de acero de una sección de tubería:

$$v = 0.5067(d^2 - D^2) * h \quad [lt]$$

De donde vamos a despejar el diámetro interno, es decir:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{v}{0.5067 * h}} \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

h: Altura (m)

$$1 \text{ (pie)} = 0.3048 \text{ (m)}$$

v: volumen de la columna (lt)

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{26(g) * 453.5(g/lb)}{7.85(g/cm^3)} = 1502.03(cm^3) = 1.502(lt)$$

Nota: Se utiliza la densidad del acero ($\rho=7.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$) y la masa en gramos ($1[lb]=453.5 \text{ [gr]}$)

Sustituyendo en (1):

$$d = \sqrt{7^2 - \frac{1.502}{0.5067 * 0.3048}} = 6.266[pg]$$

El diámetro interno de la tubería N-80 7" es de 6.266 (pg).

Calculando la Tensión:

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) [lb_{fuerza}] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo de la tubería (pg)

d: Diámetro interno de la tubería (pg)

Y_x : Esfuerzo de cedencia. Una tubería de grado N-80 tiene un esfuerzo de cedencia de 80,000 (lb/pg²)

Sustituyendo en (2):

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (7^2 - 6.266^2) = 611,809.08[lb]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la fuerza de tensión de 611,809.08 (lb).

1.1.3 Presión de colapso ¹

La falla por colapso de una tubería se origina cuando la tubería de revestimiento esta expuesta a una presión externa superior a su resistencia.

La resistencia al colapso de una tubería es función del esfuerzo de cedencia (Y_p), y de la relación entre el diámetro externo (D) y el espesor de pared (t). A esta relación se le conoce como esbeltez.

El Instituto Americano del Petróleo (API) emplea cuatro fórmulas para determinar la presión de colapso, basadas en diferentes tipos de fallas: cedencia, plástico, transición y elástico.

Cabe aclarar que las fórmulas para el tipo de falla elástica y de cedencia son del tipo teórico, mientras que las fórmulas para el tipo de falla plástico o de transición se determinaron de datos experimentales.

COLAPSO DE CEDENCIA ⁵: Este tipo de colapso es fuertemente dependiente de la cedencia del material y del espesor de la tubería. Se presenta en tuberías cuyo rango de esbeltez sea menor a 15. La ecuación para determinar la resistencia al colapso de cedencia es:

$$P_{C_{cedencia}} = 2Y_x \left[\frac{\left(\frac{D}{t}\right) - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right] \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

Y_x : Esfuerzo de cedencia
 D : Diámetro externo (pg)
 t : Espesor (pg)

El rango de esbeltez para el colapso de cedencia se muestra en la tabla 1.

COLAPSO PLÁSTICO ³: Se basa en 2488 pruebas aplicadas a tuberías K-55, N-80 y P-110. De acuerdo a un análisis de los resultados, todas las tuberías fabricadas de acuerdo a las normas API fallarán al aplicarles una presión de colapso mayor a la presión de colapso plástica mínima. La ecuación para determinar la resistencia al colapso plástico es:

$$P_{C_{plástico}} = Y_x \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - C \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

Y_x : Esfuerzo de cedencia
 D : Diámetro externo (pg)
 t : Espesor (pg)

$$A = 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5} Y_x + 0.21301 \times 10^{-10} Y_x^2 - 0.53132 \times 10^{-16} Y_x^3$$

$$B = 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6} Y_x$$

$$C = -465.93 + 0.030867 Y_x - 0.10483 \times 10^{-7} Y_x^2 + 0.36989 \times 10^{-13} Y_x^3$$

Los valores de los factores A, B y C se muestran en la tabla 2.

El rango de esbeltez para el colapso plástico se muestra en la tabla 1.

COLAPSO DE TRANSICIÓN ⁶: Es obtenido por una curva numérica ubicada entre el régimen elástico y plástico. La presión de colapso mínima entre la zona de transición plástica-elástica, se calcula de la siguiente manera:

$$P_{c_{transición}} = Y_x \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right] \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

Y_x : Esfuerzo de cedencia

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$F = \frac{46.95 \times 10^6 \left(\frac{3B/A}{2+B/A} \right)^3}{Y_x \left(\frac{3B/A}{2+B/A} - B/A \right) \left(1 - \frac{3B/A}{2+B/A} \right)^2}$$

$$G = \frac{FB}{A}$$

Los valores de los factores F y G se muestran en la tabla 2.

El rango de esbeltez para el colapso de transición se muestra en la tabla 1.

COLAPSO ELÁSTICO ⁶: Se basa en la teoría de falla por inestabilidad elástica, este criterio es independiente del esfuerzo de cedencia del material. La presión de colapso elástico mínima se calcula de la siguiente manera:

$$P_{c_{elástico}} = \frac{46.95 \times 10^6}{\left(\frac{D}{t}\right) \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1 \right]^2} \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

El rango de valores para el colapso elástico se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Rango de valores (D/t) para los diferentes tipos de colapso de acuerdo al grado de la tubería.³

GRADO	CEDECENCIA	PLASTICO	TRANSICIÓN	ELÁSTICO
H-40	16.40 y menores	16.40 – 27.01	27.01 – 42.64	42.64 y más grande
H-50	15.24 y menores	15.24 – 25.63	25.63 – 38.83	38.83 y más grande
J-K-55 y D	14.81 y menores	14.81 – 25.01	25.01 – 37.21	37.21 y más grande
-60	14.44 y menores	14.44 – 24.42	24.42 – 35.73	35.73 y más grande
-70	13.85 y menores	13.85 – 23.38	23.38 – 33.17	33.17 y más grande
C-75 y E	13.60 y menores	13.60 – 22.91	22.91 – 32.05	32.05 y más grande
L-80 y N-80	13.38 y menores	13.38 – 22.47	22.47 – 31.02	31.02 y más grande
-90	13.01 y menores	13.01 – 21.69	21.69 – 29.18	29.18 y más grande
C-95	12.85 y menores	12.85 – 21.33	21.33 – 28.36	28.36 y más grande
-100	12.70 y menores	12.70 – 21.00	21.00 – 27.60	27.60 y más grande
P-105	12.57 y menores	12.57 – 20.70	20.70 – 26.89	26.89 y más grande
P-110	12.44 y menores	12.44 – 20.41	20.41 – 26.22	26.22 y más grande
-120	12.21 y menores	12.21 – 19.88	19.88 – 25.01	25.01 y más grande
-125	12.11 y menores	12.11 – 19.63	19.63 – 24.46	24.46 y más grande
-130	12.02 y menores	12.02 – 19.40	19.40 – 23.94	23.94 y más grande
-135	11.94 y menores	11.94 – 19.18	19.18 – 23.44	23.44 y más grande
-140	11.84 y menores	11.84 – 18.97	18.97 – 22.98	22.98 y más grande
-150	11.67 y menores	11.67 – 18.57	18.57 – 22.11	22.11 y más grande
-155	11.59 y menores	11.59 – 18.37	18.37 – 21.70	21.70 y más grande
-160	11.52 y menores	11.52 – 18.19	18.19 – 21.32	21.32 y más grande
-170	11.37 y menores	11.37 – 17.82	17.82 – 20.60	20.60 y más grande
-180	11.23 y menores	11.23 – 17.47	17.47 – 19.93	19.93 y más grande

Tabla 2. Factores que se utilizan para determinar la presión de colapso plástico y colapso de transición.³

GRADO	A	B	C	F	G
H-40	2.950	0.0465	754	2.063	0.0325
H-50	2.976	0.0515	1056	2.003	0.0347
J-K-55 y D	2.991	0.0541	1206	1.989	0.0360
-60	3.005	0.0566	1356	1.983	0.0373
-70	3.037	0.0617	1656	1.984	0.0403
C-75 y E	3.054	0.0642	1806	1.990	0.0418
L-80 y N-80	3.071	0.0667	1955	1.998	0.0434
-90	3.106	0.0718	2254	2.017	0.0466
C-95	3.124	0.0743	2404	2.029	0.0482
-100	3.143	0.0768	2553	2.040	0.0499
P-105	3.162	0.0794	2702	2.053	0.0515
P-110	3.181	0.0819	2852	2.066	0.0532
-120	3.219	0.0870	3151	2.092	0.0565
-125	3.239	0.0895	3301	2.106	0.0582
-130	3.258	0.0920	3451	2.119	0.0599
-135	3.278	0.0946	3601	2.133	0.0615
-140	3.297	0.0971	3751	2.146	0.0632
-150	3.336	0.1021	4053	2.174	0.0666
-155	3.356	0.1047	4204	2.188	0.0683
-160	3.375	0.1072	4356	2.202	0.0700
-170	3.412	0.1123	4660	2.231	0.0734
-180	3.449	0.1173	4966	2.261	0.0769

Ejercicio N° 13⁴

Determinar la resistencia a la *presión de colapso* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Punto de cedencia (Y _x)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pie}	(pg)
2 3/8	N	80	4.6	1.995

Solución:

Calculando el rango de esbeltez (r) para determinar la fórmula a utilizar de acuerdo al tipo de colapso:

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{2.375-1.995}{2} = 0.19(\text{pg})$$

Sustituyendo en (1):

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) = \left(\frac{2.375}{0.19} \right) = 12.5$$

Considerando la tubería N-80 cuyo rango calculado es de 12.5 y de acuerdo a la tabla 1 es *colapso de cedencia*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso de cedencia* mínima es:

$$P_{C_{cedencia}} = 2Y_x \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right) - 1}{\left(\frac{D}{t} \right)^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

Y_x: Esfuerzo de cedencia

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

Sustituyendo:

$$P_c = 2 * 80000 * \left[\frac{12.5-1}{(12.5)^2} \right] = 11,776 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right)$$

La presión de colapso mínima para que una tubería de grado N-80 2 3/8" falle es de 11,776 (lb/pg²).

Ejercicio N° 14 *

Determinar la resistencia a la *presión de colapso* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D)	Grado	Punto de cedencia (Y _x)	peso	Diámetro Interno (d)
(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pie}	(pg)
7	N	80	23	6.276

Solución:

Calculando el rango de esbeltez (r) para determinar la fórmula a utilizar de acuerdo al tipo de colapso:

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) \quad \dots(1)$$

Calculando el espesor (pg):

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.276}{2} = 0.362(\text{pg})$$

Sustituyendo en (1):

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) = \left(\frac{7}{0.362} \right) = 19.33$$

Considerando la tubería N-80 cuyo rango calculado es de 19.33 y de acuerdo a la tabla 1 es *colapso plástico*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso plástico* mínima es:

$$P_{C \text{ plástico}} = Y_x \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t} \right)} - B \right] - C \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

Y_x: Esfuerzo de cedencia

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$A = 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5} Y_x + 0.21301 \times 10^{-10} Y_x^2 - 0.53132 \times 10^{-16} Y_x^3 \quad \dots(3)$$

$$B = 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6} Y_x \quad \dots(4)$$

$$C = -465.93 + 0.030867 Y_x - 0.10483 \times 10^{-7} Y_x^2 + 0.36989 \times 10^{-13} Y_x^3 \quad \dots(5)$$

Sustituyendo en (3):

$$A = 2.8762 + (0.10679 \times 10^{-5} * 80000) + (0.21301 \times 10^{-10} * 80000^2) - (0.53132 \times 10^{-16} * 80000^3) = 3.07$$

Sustituyendo en (4):

$$B = 0.026233 + (0.50609 \times 10^{-6} * 80000) = 0.0667$$

Sustituyendo en (5):

$$C = -465.93 + (0.030867 * 80000) - (0.10483 \times 10^{-7} * 80000^2) + (0.36989 \times 10^{-13} * 80000^3) = 1955.27$$

Sustituyendo en (2):

$$P_c = 80000 \left[\frac{3.07}{19.33} - 0.0667 \right] - 1955.27 = 5,414.36 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión de colapso mínima para que una tubería de grado N-80 7" falle es de 5,414.36 (lb/pg²).

Ejercicio N° 15

Determinar la resistencia a la *presión de colapso* de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Punto de cedencia (Y _s) 1000 (lb/pg ²)	peso Lb _{pie}	Diámetro Interno (d) (pg)
7	N	80	23	6.4

Solución:

Calculando el rango de esbeltez (r) para determinar la fórmula a utilizar de acuerdo al tipo de colapso:

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.40}{2} = 0.30(\text{pg})$$

Sustituyendo en (1):

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) = \left(\frac{7}{0.30} \right) = 23.3$$

Considerando la tubería N-80 cuyo rango calculado es de 23.3 y de acuerdo a la tabla 1 es *colapso de transición*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso de transición* mínima es:

$$P_{C_{transición}} = Y_x \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right] \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

Y_x : Esfuerzo de cedencia

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$F = \frac{46.95 \times 10^6 \left(\frac{3B/A}{2+B/A} \right)^3}{Y_x \left(\frac{3B/A}{2+B/A} - B/A \right) \left(1 - \frac{3B/A}{2+B/A} \right)^2} \quad \dots(3)$$

$$G = \frac{FB}{A} \quad \dots(4)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = \frac{46.95 \times 10^6 \left(\frac{(3 \cdot 0.667/3.07)}{(2+0.667/3.07)} \right)^3}{Y_x \left(\frac{(3 \cdot 0.0667/3.07)}{(2+0.0667/3.07)} - (0.667/3.07) \right) \left(1 - \frac{(3 \cdot 0.667/3.07)}{(2+0.667/3.07)} \right)^2} = 2.010$$

Sustituyendo en (4):

$$G = \frac{FB}{A} = \frac{(2.010 \cdot 0.0667)}{3.07} = 0.0436$$

Los valores de A y B se calcularon en el ejercicio N° 14, ya que la tubería es del mismo grado.

Sustituyendo en (2):

$$P_c = 80000 \left[\frac{2.010}{23.3} - 0.0436 \right] = 3,413.28 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión de colapso mínima para que una tubería de grado N-80 7" (d=6.4) falle es de 3.413.28 (lb/pg²).

Ejercicio N° 16 ⁴

Determinar la resistencia a la presión de colapso de la siguiente tubería:

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Punto de cedencia (Y _x) (lb/pg ²)	Diámetro Interno (d) (pg)
7	N	80	6.466

Solución:

Calculando el rango de esbeltez (r) para determinar la fórmula a utilizar de acuerdo al tipo de colapso:

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) \quad \dots(1)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.55}{2} = 0.225(\text{pg})$$

Sustituyendo:

$$r = \left(\frac{7}{0.225} \right) = 31.11$$

Considerando la tubería N-80 cuyo rango calculado es de 31.11 y de acuerdo a la tabla 1 es *colapso elástico*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso elástico* mínima es:

$$P_{c \text{ elástico}} = \frac{46.95 \times 10^6}{\left(\frac{D}{t} \right) \left[\left(\frac{D}{t} \right) - 1 \right]^2} \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

donde:

D: Diámetro externo (pg)

t: Espesor (pg)

Sustituyendo:

$$P_c = \frac{46.95 \times 10^6}{31.11 [31.11 - 1]^2} = 1,664.61 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión de colapso mínima para que una tubería de grado N-80 2 3/8" falle es de 1,664.61 (lb/pg²).

1.2 Presiones y fuerzas internas y externas

Las cargas por presión que se presentan en las tuberías son generadas por efecto de la presión hidrostática de los fluidos, actuando tanto en el interior como en el exterior del tubo. Además, se manifiestan diferentes cargas de presión por efecto del flujo de fluidos durante las operaciones de terminación tales como: inducción, estimulación, producción, etc.

Las presiones actuantes en las paredes de una tubería pueden ser tanto externas como internas. Es decir, la presión ejercida por cualquier fluido sobre las paredes de una tubería se presenta por la parte exterior de la tubería, con relación al área expuesta definida por el diámetro externo del tubo, y por la parte interna, con relación al área expuesta definida por el diámetro interior del tubo.

En estas condiciones las tuberías quedan sujetas a la acción de fuerzas actuando por efecto de la presión. El efecto neto de la presión actuante será el diferencial de presión presente entre el exterior y el interior del tubo. Por lo tanto, para establecer las condiciones de presión neta actuando en un tubo debemos evaluar las condiciones de presión actuantes por la parte externa de la tubería y por otro lado evaluar las condiciones de presión actuantes en la parte interna de la misma.

La presión hidrostática ⁷ es aquella que ejerce el peso de una columna de fluido por unidad de área. Ésta es función de la altura de la columna del fluido y del peso específico del mismo. Las dimensiones y geometría de la columna de fluido no tienen efecto en la presión hidrostática. La altura de la columna de fluido es la distancia entre el punto de medición y la proyección de la ubicación del pozo, perpendicular a este punto (profundidad vertical verdadera).

Esta se define por la siguiente ecuación:

$$P_h = \rho * g * h = \rho * 9.81 * h$$

donde:

P_h : Presión hidrostática (Pascuales)
 ρ : Densidad promedio del fluido (kg/m^3)
 g : Aceleración de la gravedad ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)
 h : Altura vertical de la columna de agua (m)

En la práctica se usa la siguiente fórmula:

$$P_h = \rho * \frac{h}{10}$$

donde:

P_h : Presión hidrostática (kg/cm^2)
 ρ : Densidad promedio del fluido (kg/m^3)
 h : Altura vertical de la columna de fluido (m)

El coeficiente 10 toma en consideración las unidades métricas de campo y la aceleración de la gravedad.

Para determinar la presión externa que está actuando sobre las paredes de la tubería a la profundidad de interés, se debe calcular la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. De esta manera el valor mayor de presión se encontrará en el fondo del pozo y el menor valor en la superficie.

Los esfuerzos debidos a la presión interna son causados principalmente por la presión hidrostática que ejercen los fluidos dentro de la tubería.

Si la tubería esta sujeta a presión interna y externa, la presión externa equivalente se calcula de la siguiente forma:³

$$Pe = Po - \left(1 - \frac{2}{D/t}\right) Pi = \Delta p + \left(\frac{2}{D/t}\right) Pi$$

Para que esta relación sea más entendible, la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:³

$$Pe = \frac{PoD - Pid}{D}$$

donde:

- Pe: Presión equivalente (lb/pg²)
- Po: Presión externa (lb/pg²)
- Pi: Presión interna (lb/pg²)
- D: Diámetro externo (pg)
- d: Diámetro interno (pg)

Una de las principales causas de falla en las tuberías es la acción de las cargas axiales⁶ en las operaciones de un pozo. La condición establece que la resistencia axial sea superior a la carga axial impuesta para garantizar la seguridad de no-deformación de la tubería. Por lo tanto, debemos estimar la fuerza axial que actúa sobre la tubería, para determinar si esta resiste o no.

Lo anterior se puede calcular, a partir de la siguiente ecuación:

$$Y_x = \frac{F}{A_s}$$

Donde A_s es el área transversal del tubo y F es el efecto axial debido al propio peso de la sarta de tuberías:

$$F = \sum w_i h_i$$

donde:

- F: Fuerza ejercida por el peso total de la sarta (al aire) (lb_f)
- w_i: Peso unitario de la tubería (lb_f/pie)
- h_i: Longitud de la sarta (pies)

El efecto que causa la presión hidrostática⁶ sobre la tubería sumergida en un fluido dentro del pozo se le conoce como fuerza de flotación. Un método práctico para determinar el efecto de flotación es mediante la aplicación del concepto de Arquímedes. Este establece que todo cuerpo sumergido en el seno de un fluido experimenta una fuerza contraria o empuje sobre el peso del cuerpo con una magnitud igual al peso del fluido desplazado. Por lo anterior, se determina el factor de flotación de la siguiente forma:

$$F_f = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_o}$$

donde:

F_f : Factor de flotación

ρ_f : Densidad del fluido (gr/cm^3)

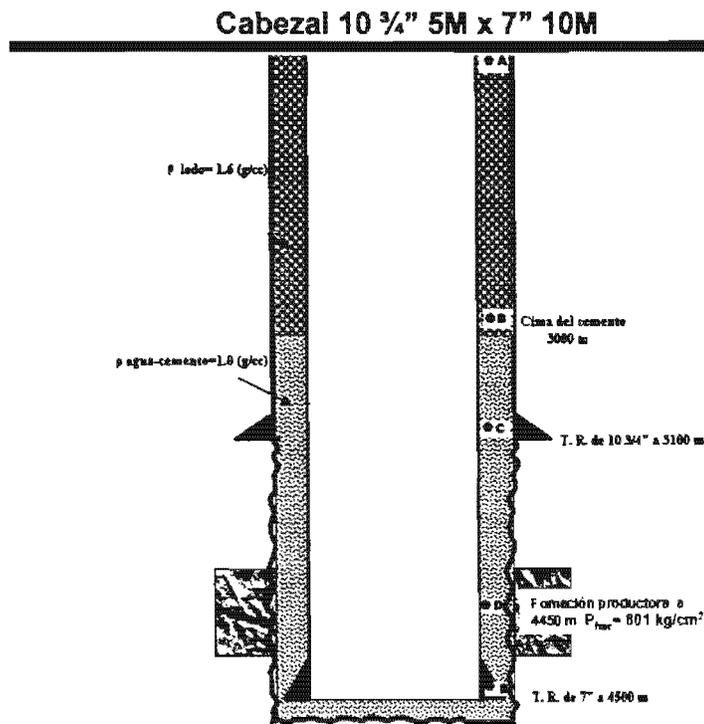
ρ_a : Densidad del acero (gr/cm^3)

El factor de flotación se multiplica por el peso "al aire" de la sarta de tuberías para considerar en forma práctica el efecto de flotación.

Ejercicio N° 17 ⁴

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" TRC-95 35 (lb/pie) ($d=6.004''$) de 0 a 1500 m, una de 7" N-80 38 (lb/pie) ($d=5.992''$) de 1500 a 3000 m y una de 7" P-110 35 (lb/pie) ($d=6.004''$) de 3000 a 4500 m. La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000 m, la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x 7" 10M; para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T. R. intermedia de 10 3/4" N-80 51 (lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm^3), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm^3). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m.

Considerando el espacio anular cerrado, determinar la presión externa aplicada en la tubería de explotación a la altura del cabezal, a la profundidad de la cima de cemento, a la profundidad de la zapata de 10 3/4", a la profundidad del intervalo de interés y en el fondo del pozo.



Solución:

Calculando la Presión externa a la altura del cabezal (P_{oA}):

$$P_{oA} = P_{\text{formación}} - P_{\text{fluido}} - P_{\text{col. cemento}} \dots\dots(1)$$

La presión de formación se calcula utilizando la densidad del lodo con la que se perforó la última etapa ($\rho_{\text{lodo}}=1.6 \text{ g/cm}^3$) y a la profundidad del intervalo de interés:

$$P_f = \frac{\left(1.6 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] (4450\text{m})\right)}{10} = 712 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] = 10,124.64 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión de la columna del fluido es igual a la presión hidrostática que ejerce el lodo con el que se perforó la última etapa ($\rho_{\text{lodo}}=1.6 \text{ g/cm}^3$) a 3000 m.

$$P_{\text{fluido}} = \frac{1.6(3000)}{10} 14.22 = 6825.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

La presión de la columna de cemento es igual a la presión hidrostática que ejerce el cemento ($\rho_{\text{cemento}}=1.0 \text{ g/cm}^3$) desde 3000m hasta el intervalo de interés.

$$P_{\text{col.cemento}} = \frac{1(1450)}{10} 14.22 = 2061.9 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo las presiones en (1)

$$P_{oA} = 10124.64 - 6825.6 - 2061.9 = 1,237.14 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa a la profundidad de la cima del cemento (P_{oB}):

$$P_{oB} = P_{oA} + P_{\text{fluido @3000m}} \dots\dots(2)$$

La presión externa en el punto A se calculó anteriormente, y la presión a 3000 m es igual a la presión hidrostática que ejerce el lodo ($\rho_{\text{lodo}}=1.6 \text{ g/cm}^3$) a la profundidad de 3000 m.

$$P_{\text{fluido@3000m}} = \frac{1.6(3000)}{10} 14.22 = 6825.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo las presiones en (2)

$$P_{oB} = 1237.14 + 6825.6 = 8,062.7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa a la profundidad de la zapata de 10 3/4" (P_{oC}):

$$P_{oC} = P_{oA} + P_{\text{fluido @3000m}} + P_{\text{col.cemento @3100m}} \dots\dots(3)$$

La presión externa en el punto A y la presión a 3000 m se calcularon anteriormente, la presión a 3100 m es igual a la presión hidrostática que ejerce el cemento ($\rho_{\text{cemento}}=1.0 \text{ g/cm}^3$) en los 100 m debajo de la cima del cemento.

$$P_{\text{col.cemento}_a_3100m} = \frac{1(100)}{10} 14.22 = 142.2$$

Sustituyendo las presiones en (3)

$$P_{oC} = 1237.14 + 6825.6 + 142.2 = 8,204.9 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa a la profundidad del intervalo de interés (P_{oD}):

$$P_{oD} = P_{oA} + P_{\text{fluido @3000m}} + P_{\text{col.cemento @4450m}} \dots\dots(4)$$

La presión externa en el punto A y la presión a 3000 m se calcularon anteriormente, la presión a 4450 m es igual a la presión hidrostática que ejerce el cemento ($\rho_{\text{cemento}}=1.0 \text{ g/cm}^3$) en los 1450 m debajo de la cima del cemento.

$$P_{\text{col.cemento}_a_{4450m}} = \frac{1(1450)}{10} 14.22 = 2061.9 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo las presiones en (4)

$$P_{oD} = 1237.14 + 6825.6 + 2061.9 = 10,124.64 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa a la profundidad del fondo del pozo (P_{oE}):

$$P_{oE} = P_{oD} + P_{\text{col.cemento}@4500m} \dots (5)$$

La presión externa en el punto D se calculó anteriormente, la presión a 4500 m es igual a la presión hidrostática que ejerce el cemento ($\rho_{\text{cemento}}=1.0 \text{ g/cm}^3$) en los 50 m debajo del intervalo de interés.

$$P_{\text{col.cemento}_a_{4500m}} = \frac{1(50)}{10} 14.22 = 71.1 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo las presiones en (5)

$$P_{oE} = 10124.6 + 71.1 = 10,195.7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Ejercicio N° 18⁴

Continuando con el ejercicio N° 17, determinar la presión interna aplicada en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Solución:

Considerando que el interior de la TR está abierto, ya que se desplazo el cemento la presión interna a la altura del cabezal es cero ($P_{iA}=0$).

La presión interna a la profundidad de la cima del cemento es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido con el que se perforó la última etapa ($\rho_{\text{fluido}}=1.6 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de 3000 m (P_{iB}):

$$P_{iB} = \frac{1.6(3000)}{10} 14.22 = 6,825.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión interna a la profundidad de la zapata de 10 3/4" es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido ($\rho_{\text{fluido}}=1.6 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de 3100 m (P_{iC}):

$$P_{iC} = \frac{1.6(3100)}{10} 14.22 = 7,053.12 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión interna a la profundidad del intervalo de interés es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido ($\rho_{\text{fluido}}=1.6 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de 4450 m (P_{iD}):

$$P_{iD} = \frac{1.6(4450)}{10} 14.22 = 10,124.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión interna a la profundidad del fondo del pozo es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido ($\rho_{\text{ fluido }}=1.6 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de 4500 m (P_{iE}):

$$P_{iE} = \frac{1.6(4500)}{10} 14.22 = 10,238.4 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Ejercicio N° 19⁴

Continuando con el ejercicio N° 17, determinar la presión equivalente aplicada en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Solución:

Calculando la presión equivalente a la altura del cabezal:

$$P_{eA} = \frac{P_{oA}D - P_{iA}d}{D} \dots(1)$$

donde:

P_o : Presión externa (lb/pg²)

P_i : Presión interna (lb/pg²)

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

La presión externa y la presión interna aplicada a la T. R., se calcularon en los dos problemas anteriores, donde $P_o=1237.14$ (lb/pg²) y $P_i=0$ sustituyendo en (1):

$$P_{eA} = \frac{(1237.14 * 7) - 0}{7} = 1,237 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión equivalente a la altura del cabezal es de 1,237 (lb/pg²)

Calculando la presión equivalente a la profundidad de la cima del cemento (B):

$$P_{eB} = \frac{P_{oB}D - P_{iB}d}{D} \dots(2)$$

Sustituyendo en (2):

$$P_{eB} = \frac{(8062.7 * 7) - (6825.6 * 5.992)}{7} = 2,219.98 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión equivalente a la profundidad de la zapata de 10 ¾" (C):

$$P_{eC} = \frac{P_{oC}D - P_{iC}d}{D} \dots(3)$$

Sustituyendo en (3):

$$Pe_c = \frac{(8204.9 * 7) - (7053.12 * 6.004)}{7} = 2,155.37 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión equivalente a la profundidad del intervalo de interés (D):

$$Pe_D = \frac{Po_D D - Pi_D d}{D} \dots(4)$$

Sustituyendo en (4):

$$Pe_D = \frac{(10124.6 * 7) - (10124.6 * 6.004)}{7} = 1,440.59 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión equivalente en el fondo del pozo (E):

$$Pe_E = \frac{Po_E D - Pi_E d}{D} \dots(5)$$

Sustituyendo en (5):

$$Pe_E = \frac{(10195.7 * 7) - (10238.4 * 6.004)}{7} = 1,414.11 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Ejercicio N° 20⁴

Continuando con el ejercicio N° 17, determinar el esfuerzo axial que se encuentra aplicado en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Solución:

El esfuerzo axial es:

$$Y_x = \frac{F}{A_s} \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

Y_x : Esfuerzo axial (lb/pg²)

F: Fuerza axial de cedencia (lb)

A_s : Área transversal (pg)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \text{ (pg)}$$

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

Sustituyendo:

$$Y_x = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \dots(1)$$

Para determinar el esfuerzo axial en cada punto, se considera que el cemento no ha fraguado, es decir. la fuerza de flotación esta actuando en cada punto.

Calculando la fuerza de flotación:

$$F_F = \left[\left(1.6 \frac{gr}{cm^3} * 3000m \right) + \left(1.0 \frac{gr}{cm^3} * 1500 \right) \right] * \left[\frac{\pi}{4} (7^2 - 6.004^2) \right] * 0.1 * 14.22 = 91,131.04 [lb]$$

Debemos considerar que la fuerza de flotación es la presión que ejercen los fluidos en los que se encuentra sumergida la tubería por el área transversal de la tubería que se encuentra en el fondo del pozo. Los valores de 0.1 y 14.22 son factores de conversión.

Calculando el esfuerzo axial a la altura del cabezal (A):

Para determinar la fuerza ejercida sobre la tubería a la altura del cabezal se considera la tensión del 70% aplicada a la tubería y la fuerza de flotación.

$$F'_A = [W_{TR35F} * (1500 - 0)m + W_{TR38F} * (3000 - 1500)m + W_{TR35F} * (4500 - 3000)m] * 3.28 * 0.70$$

$$F'_A = 371,952(lb)$$

Pero como la fuerza de flotación está ejerciendo una fuerza en sentido contrario al peso de la tubería. se le debe de restar al peso total de las tuberías:

$$F_A = F'_A - F_F = 371,952(lb) - 91,131.04(lb) = 280,820.96(lb)$$

Sustituyendo en (1):

$$Y_{xA} = \frac{280820.96}{\frac{\pi}{4} (7^2 - 6.004^2)} = 27,605.99 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo axial a la profundidad de la cima del cemento:

$$F'_B = [W_{TR35F} * (4500 - 3000)m] * 3.28 * 0.70 = 120,540(lb)$$

Pero como la fuerza de flotación está ejerciendo una fuerza en sentido contrario al peso de la tubería. se le debe de restar al peso de la tubería que esta cargando el punto B:

$$F_B = F'_B - F_F = 120,540(lb) - 91,131.04(lb) = 29,408.96(lb)$$

Sustituyendo en (1):

$$Y_{xB} = \frac{29,408.96}{\frac{\pi}{4} (7^2 - 5.992^2)} = 2,859.25 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo axial a la profundidad de la zapata de 10 3/4":

$$F'_C = [W_{TR35F} * (4500 - 3100)m] * 3.28 * 0.70 = 112,504(lb)$$

Pero como la fuerza de flotación está ejerciendo una fuerza en sentido contrario al peso de la tubería, se le debe de restar al peso de la tubería que esta cargando el punto C:

$$F_C = F'_C - F_F = 112,504(lb) - 91,131.04(lb) = 21,372.96(lb)$$

Sustituyendo en (1):

$$Y_{xC} = \frac{21,372.96}{\frac{\pi}{4}(7^2 - 6.004^2)} = 2,101.06 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo axial a la profundidad del intervalo de interés:

$$F'_D = [W_{TR35\#} * (4500 - 4450)m] * 3.28 * 0.70 = 4,018(lb)$$

Pero como la fuerza de flotación está ejerciendo una fuerza en sentido contrario al peso de la tubería, se le debe de restar al peso de la tubería que esta cargando el punto D:

$$F_D = F'_D - F_F = 4,018(lb) - 91,131.04(lb) = -87,113.04(lb)$$

En este punto la tubería está expuesta a un esfuerzo de compresión que está ejerciendo la fuerza de flotación.

Sustituyendo en (1):

$$Y_{xD} = \frac{-87,113.04}{\frac{\pi}{4}(7^2 - 6.004^2)} = -8,563.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo axial a la profundidad del fondo del pozo:

En el fondo del pozo la tubería está expuesta a un esfuerzo de compresión que ejerce la fuerza de flotación.

Sustituyendo en (1):

$$Y_{xE} = \frac{-91,131.04}{\frac{\pi}{4}(7^2 - 6.004^2)} = -8,958.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

2. Determinación del esfuerzo triaxial⁶

Todas las ecuaciones utilizadas para calcular la resistencia de la tubería se basan en un estado de esfuerzo axial, el estado en el que solo uno de los tres esfuerzos principales no es cero. Sin embargo, la realidad es diferente, ya que la tubería siempre estará expuesta a una combinación de esfuerzos. El esfuerzo triaxial no es un esfuerzo verdadero, es un valor teórico de la resultante de esfuerzos en tres dimensiones que puede compararse con el esfuerzo de cedencia de la tubería. En otras palabras, si el esfuerzo triaxial excede el esfuerzo de cedencia, se presentará una falla.

Se han propuesto una buena cantidad de teorías encaminadas a resolver o plantear mediante el uso de modelos matemáticos la predicción de la resistencia de un material ante la imposición de diferentes esfuerzos.

El concepto fundamental para el diseño de tuberías establece que si cualquier esfuerzo aplicado a la pared de la tubería excede el esfuerzo de cedencia del material, se presentará una condición de falla. Una de las teorías más fundamentadas y utilizadas en la teoría clásica de la elasticidad para cuantificar la magnitud de los esfuerzos que toman lugar en un material para hacerlo fallar, es la teoría "de la distorsión de la energía de deformación máxima" propuesta por Von Mises. Dicha teoría estipula que existe un esfuerzo equivalente a partir del cual los tres esfuerzos principales actuando en un material están en equilibrio. Su representación en coordenadas cilíndricas y aplicado para una tubería es:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2} \dots\dots(1)$$

donde:

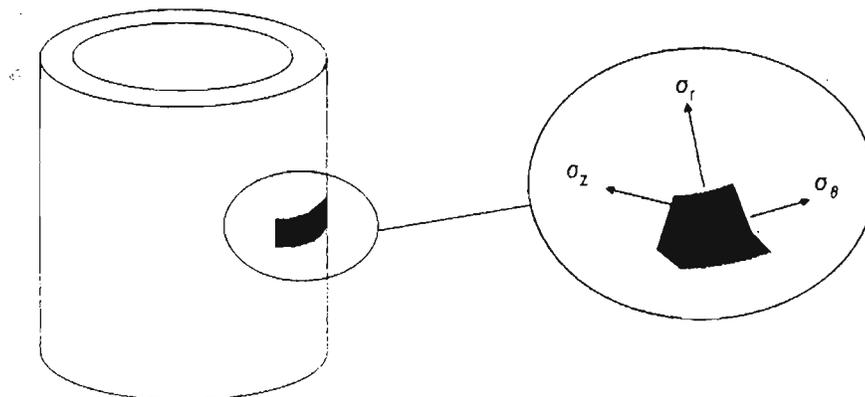


Fig. 1 Representación de los esfuerzos equivalentes (Axial, radial y tangencial)

- σ_t : Esfuerzo triaxial
- σ_z : Esfuerzo axial
- σ_θ : Esfuerzo Tangencial

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_o r_o^2 (r_i^2 + r^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \dots\dots(2)$$

σ_r : Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{-P_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) - P_o r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \dots (3)$$

donde:

P_o : Presión externa (lb/pg²)
 P_i : Presión interna (lb/pg²)
 D : Diámetro externo (pg)
 d : Diámetro interno (pg)

t : Espesor (pg)
 r_i : Radio interno (pg)
 r_o : Radio externo (pg)

Para determinar el esfuerzo triaxial en cualquier punto del cuerpo de la tubería, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \sqrt{f_3^2 + f_1^2 f_2^2} \dots (A)$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{r_i}{r}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} (P_o - P_i) \qquad f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)}$$

$$f_3 = \sigma_z - \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2}$$

Podemos demostrar que la ecuación (1) es igual a la ecuación (A):

Desarrollando (1):

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^2 - 2\sigma_\theta\sigma_r + \sigma_r^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_r\sigma_z + \sigma_z^2}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - \sigma_x\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_r - \sigma_r\sigma_z} \dots (4)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (4):

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_z^2 + \left(\frac{r_i^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o\right)^2 + \left(\frac{r_i^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o\right)^2 - \sigma_z \left[\frac{r_i^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o \right] - \left(\frac{r_i^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 + r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o \right) \left(\frac{r_i^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o \right) - \sigma_z \left[\frac{r_i^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_i - \frac{r_o^2 - r_i^2 r_o^2 / r^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o \right]}$$

Desarrollando términos:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 + \frac{1}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \left[2P_i^2(r_i^4 + r_i^4 r_o^4 / r^4) - 4P_i P_o(r_i^2 r_o^2 + r_i^4 r_o^4 / r^4) + 2P_o^2(r_o^4 + r_i^4 r_o^4 / r^4) \right]} \\ - 2\sigma_z \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right) - \left[\frac{P_i^2(r_i^4 - r_i^4 r_o^4 / r^4) - 2P_i P_o(r_i^2 r_o^2 - r_i^4 r_o^4 / r^4) + P_o^2(r_o^4 - r_i^4 r_o^4 / r^4)}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \right]$$

Simplificando:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 - 2\sigma_z \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right) + \frac{P_i^2(r_i^4 + 3r_i^4 r_o^4 / r^4) - 2P_i P_o(r_i^2 r_o^2 + 3r_i^4 r_o^4 / r^4) + P_o^2(r_o^4 + r_i^4 r_o^4 / r^4)}{(r_o^2 - r_i^2)^2}}$$

Agrupando términos:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 - 2\sigma_z \left(\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right) + \frac{r_i^4 P_i^2 - 2P_i P_o r_i^2 r_o^2 + r_o^4 P_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2} + \frac{r_i^4 r_o^4 / r^4 (3P_i^2 - 6P_i P_o + 3P_o^2)}{(r_o^2 - r_i^2)^2}} \quad \dots(5)$$

Desarrollando f_3 :

$$f_3 = \sigma_z - \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$f_3^2 = \left(\sigma_z - \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right)^2$$

$$f_3^2 = \sigma_z^2 - \frac{2\sigma_z(r_i^2 P_i - r_o^2 P_o)}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_i^4 P_i^2 - 2r_i^2 r_o^2 P_i P_o + r_o^4 P_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2}$$

Sustituyendo f_3^2 en (5):

$$\sigma_i = \sqrt{f_3^2 + \frac{3r_i^4 r_o^4 / r^4 (P_i^2 - 2P_i P_o + P_o^2)}{(r_o^2 - r_i^2)^2}}$$

$$\sigma_i = \sqrt{f_3^2 + \frac{3r_i^4 r_o^4 / r^4 (P_o - P_i)^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2}} \quad \dots(6)$$

Desarrollando f_1 :

$$f_1 = \left(\frac{r_i}{r} \right) \frac{\sqrt{3}}{2} (P_o - P_i)$$

$$f_1^2 = \left[\left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \frac{\sqrt{3}}{2} (P_o - P_i) \right]^2$$

$$f_1^2 = \left(\frac{r_i^4}{r^4} \frac{3}{4} (P_o - P_i)^2 \right) \left(\frac{4r_o^4}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \right)$$

Sustituyendo f_1^2 en (6):

$$\sigma_t = \sqrt{f_3^2 + f_1^2 \left(\frac{4r_o^4}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \right)} \dots (7)$$

Desarrollando f_2 :

$$f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t} \right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1 \right)}$$

$$f_2^2 = \left(\frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t} \right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1 \right)} \right)^2$$

$$f_2^2 = \left(\frac{1}{2} \frac{(2r_o / (r_o - r_i))^2}{(2r_o / (r_o - r_i)) - 1} \right)^2$$

$$f_2^2 = \frac{4r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2}$$

Sustituyendo f_2^2 en (7):

$$\sigma_t = \sqrt{f_3^2 + f_1^2 f_2^2} \dots (A)$$

Quedando demostrado que la ecuación (1) es igual a la ecuación (A). Por lo que el esfuerzo triaxial en cualquier punto de la tubería se calcula con la ecuación (A).

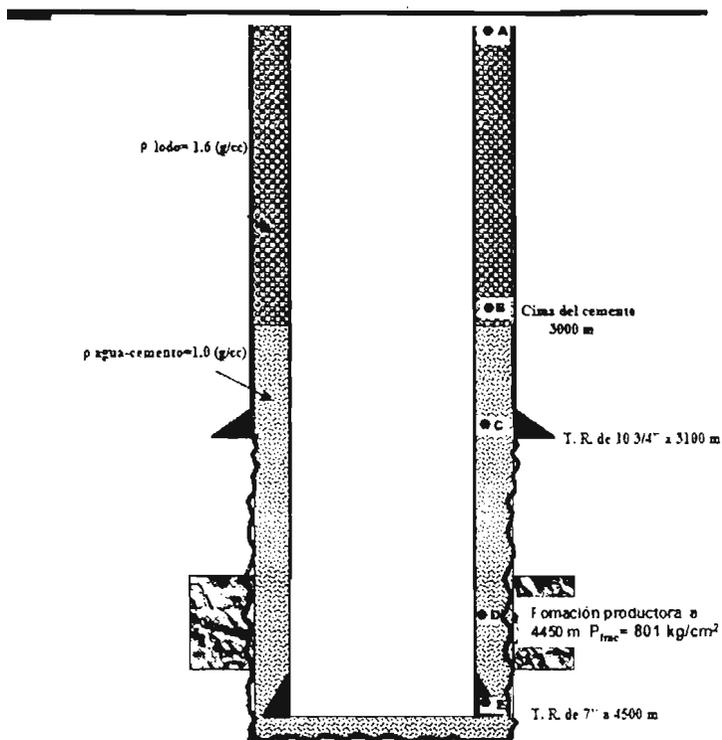
A fin de explicar el modelo de Von Mises para determinar la resistencia de los elementos tubulares, se consideró que el esfuerzo equivalente se representa por la cedencia del material. Es decir, el máximo esfuerzo equivalente que pudiera experimentar una tubería sería de una magnitud equivalente a la cedencia del material. Sin embargo, es preciso apuntar que esta consideración implica suponer que la acción de un esfuerzo monoaxial como es la cedencia, represente la acción de los tres esfuerzos principales actuando en un material simultáneamente. Lo anterior significa que estamos aceptando como criterio de falla, una vez más, a la cedencia del material.¹

Ejercicio N° 21⁴

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" TRC-95 35 (lb/pie) de 0 a 1500 m, una de 7" N-80 38 (lb/pie) de 1500 a 3000 m y una de 7" P-110 35 (lb/pie) de 3000 a 4500 m. La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000m, la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x 7" 10M; para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T. R. intermedia de 10 3/4" N-80 51#. La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 gr/cm³, utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 gr/cm³. El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m.

Considerando el espacio anular cerrado, determinar el esfuerzo triaxial que está siendo aplicado en la tubería de explotación a la altura del cabezal, a la profundidad de la cima de cemento, a la profundidad de la zapata de 10 3/4", a la profundidad del intervalo de interés y en el fondo del pozo.

Cabezal 10 3/4" 5M x 7" 10M



Solución:

Calculando el esfuerzo triaxial a la altura del cabezal (σ_T):

$$\sigma_T = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2} \dots (1)$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (P_o - P_i) \dots (2)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right)^2}{\left(\frac{D}{t} \right) - 1} \right] \dots (3)$$

$$f_3 = \sigma_z - \left[\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right] \dots (4)$$

La presión interna y la presión externa se calcularon en el ejercicio N° 17 y N° 18 respectivamente.

Calculando el espesor (t):

$$t = \frac{D - d}{\gamma} = \frac{7 - 6.004}{\gamma} = 0.498 \text{ (pg)}$$

Sustituyendo en (2):

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(1237.14 - 0) = 1,071.36 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (3):

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.498}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.498}\right) - 1} \right] = 7.5664 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (4):

$$f_3 = 24714.95 - \left[\frac{(3.002)^2 * 0 - (3.5)^2 (1237.14)}{(3.5)^2 - (3.002)^2} \right] = 29,395.3 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1):

$$\sigma_{TA} = \sqrt{(1071.36 * 7.5664)^2 + (29395.3)^2} = 30,492.56 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la profundidad de la cima del cemento (σ_B):

Calculando el espesor (t):

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-5.992}{2} = 0.504 \text{ (pg)}$$

Sustituyendo en (2):

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(4649.9 - 3412.8) = 1,071.39 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (3):

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.504}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.504}\right) - 1} \right] = 7.4832 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (4):

$$f_3 = 7786.95 - \left[\frac{[(2.96)^2 * 6825.6] - [(3.5)^2 (8062.74)]}{(3.5)^2 - (2.96)^2} \right] = 1,338.18 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1):

$$\sigma_{TB} = \sqrt{(1071.39 * 7.4832)^2 + (1338.18)^2} = 8,128.33 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la profundidad de la zapata de 10 3/4" (σ_C):

Sustituyendo en (2):

$$f_1 = \left(\frac{2.96}{2.96}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (8004.94 - 7053.12) = 997.5 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (3):

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.498}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.498}\right) - 1} \right] = 7.5664 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (4):

$$f_3 = 28784.31 - \left[\frac{[(3.002)^2 * 7053.12] - [(3.5)^2 (8204.94)]}{(3.5)^2 - (3.002)^2} \right] = 40,195 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1):

$$\sigma_{TC} = \sqrt{(997.5 * 7.5664)^2 + (40195)^2} = 40,897.46 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la profundidad del intervalo de interés (σ_D):

Sustituyendo en (2):

$$f_1 = \left(\frac{2.96}{2.96}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (10124.64 - 10124.64) = 0 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (3):

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.498}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.498}\right) - 1} \right] = 7.5664 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (4):

$$f_3 = 40820.23 - \left[\frac{[(3.002)^2 * 10124.64] - [(3.5)^2 (10124.64)]}{(3.5)^2 - (3.002)^2} \right] = 50944.87 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1):

$$\sigma_{TD} = \sqrt{(0 * 7.5664)^2 + (50944.87)^2} = 50,944.87 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la profundidad del fondo del pozo (σ_E):

Sustituyendo en (2):

$$f_1 = \left(\frac{2.96}{2.96}\right)^2 \left(\frac{3}{2}\right) (10195.74 - 10238.4) = -36.94 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (3):

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.498}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.498}\right) - 1} \right] = 7.5664 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo en (4):

$$f_3 = 41266.01 - \left[\frac{[(3.002)^2 * 10238.04] - [(3.5)^2 (10195.74)]}{(3.5)^2 - (3.002)^2} \right] = 51343.01 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1):

$$\sigma_{TE} = \sqrt{(-36.94 * 7.5664)^2 + (51343.01)^2} = 51,343.78 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

3. Determinación de la elipse de esfuerzos triaxiales

Una forma alterna de representar el modelo triaxial de Von Mises ⁶ para su aplicación en el campo de ingeniería, ha sido resultado de simplificar, a partir de la misma teoría clásica de elasticidad, el significado de los esfuerzos tangenciales y radiales mediante las ecuaciones de Lamé:

$$\sigma_R = \frac{-P_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) - P_o r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

$$\sigma_T = \frac{P_i r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_o r_o^2 (r_i^2 + r^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

P_o : Presión externa (lb/pg²)

P_i : Presión interna (lb/pg²)

t : Espesor (pg)

r_i : Radio interno (pg)

r_o : Radio externo (pg)

Ecuación del modelo triaxial:

$$\sigma_t = \sqrt{f_3^2 + f_1^2 f_2^2}$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{r_i}{r}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} (P_o - P_i) \qquad f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)}$$

$$f_3 = \sigma_z = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2}$$

El modelo anterior queda representado mediante las variables de presión externa, presión interna, esfuerzo axial, delgadez y cedencia del material.

A fin de determinar la resistencia de las tuberías con este modelo triaxial, se realizan las siguientes consideraciones, o lo que algunos han llamado procedimiento de normalización:

- 1) Para evaluar la capacidad de resistencia a la falla por colapso:

Suponer la NO existencia de presión por el interior de la tubería.

Simplificar en términos de presión externa la ecuación del modelo triaxial:

$$\sigma_z = -\omega_1 P_o \pm \sqrt{Y_x^2 - \left[\frac{3}{2} P_o f_2 \right]^2} \qquad P_o = \pm \frac{Y_x^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}$$

donde:

$$\omega_1 = \frac{ro^2}{ro^2 - ri^2} \qquad \omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2$$

El resultado de lo anterior representa en forma gráfica una elipse cuyo contorno simboliza la resistencia al colapso para las diferentes condiciones de esfuerzo axial. Para fines prácticos se utiliza la región del tercer y cuarto cuadrante de la gráfica. Es decir la parte negativa de las presiones resultantes.

2) Para evaluar la capacidad de resistencia a la presión por estallamiento:

Suponer la NO existencia d presión por el exterior de la tubería.

Simplificar en términos de presión interna la ecuación del modelo triaxial. Resolver la ecuación cuadrática resultante.

$$\sigma_2 = \omega_3 Pi \pm \sqrt{Y_x^2 - \left[-\sqrt{\frac{3}{2}} Pi f_2 \right]^2} \qquad Pi = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{\omega_3^2 + \omega_2^2}}$$

donde:

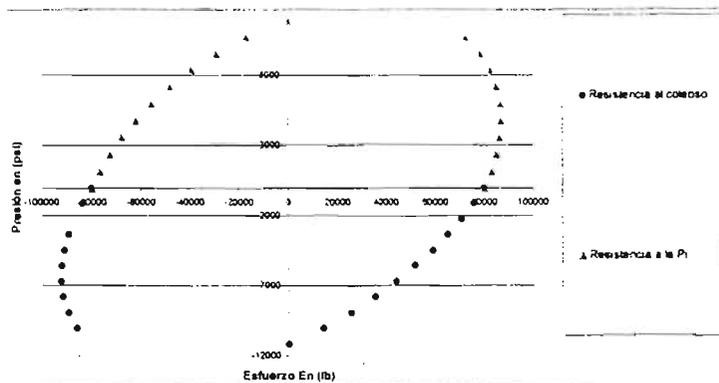
$$\omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 \qquad \omega_3 = \frac{ri^2}{ro^2 - ri^2}$$

El resultado de lo anterior representa en forma gráfica una elipse cuyo contorno simboliza la resistencia al estallamiento para las diferentes condiciones de esfuerzo axial. Para fines prácticos se utiliza la región del primer y segundo cuadrante de la gráfica. Es decir, la parte positiva de las presiones resultantes.

3) Representación triaxial:

En forma convencional representar las dos curvas resultantes en un solo gráfico, trazando en el primer y segundo cuadrante la curva que representa la resistencia al estallamiento. Y la segunda curva, que representa la resistencia al colapso, colocarla en el tercer y cuarto cuadrante.

El resultado de aplicar este convencionalismo, genera una elipse que representa los límites de resistencia a la falla por colapso y por estallamiento a las diferentes condiciones de esfuerzo axial. Es decir, se manejan tres variables para representar la resistencia del material. La cedencia del material queda representada por la magnitud de la elipse.



Ejercicio N° 22⁴

Determinar la elipse de esfuerzos triaxiales para las tuberías del ejercicio N° 21

Diámetro Externo (D) (pg)	Grado	Punto de cedencia (Y _r) 1000 (lb/pg ²)	peso Lb _{pie}	Diámetro Interno (d) (pg)
7	TRC	95	35	6.004
7	N	80	38	5.92
7	P	110	35	6.004

Solución:

Calculando la elipse de esfuerzos triaxiales para la TRC-95 :

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.004}{2} = 0.498 \text{ (pg)}$$

$$r = \frac{D}{t} = \frac{7}{0.498} = 14.0562$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)} = 7.5664 \text{ (pg)}$$

$$r_o = 3.5 \text{ (pg)} \qquad r_i = 3.002 \text{ (pg)}$$

$$\omega_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.5^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 3.7832$$

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7.5664 = 6.5527$$

$$\omega_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.002^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 2.7832$$

Limites de la grafica:

$$P_o = \pm \frac{Y_r^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} = \pm \frac{95000^2}{3.7832^2 + 6.5527^2} = 12.555.495 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

$$P_i = \pm \frac{Y_r^2}{\omega_3^2 + \omega_2^2} = \pm \frac{95000^2}{2.7832^2 + 6.5527^2} = 13,344.049 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

Para la grafica se utilizan las siguientes ecuaciones con las condiciones de frontera y a diferentes presiones:

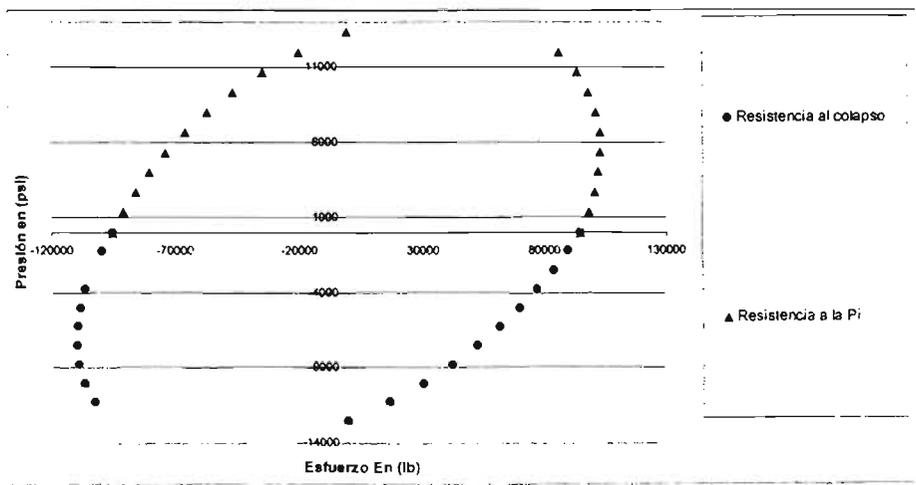
$$\sigma_z = -\omega_1 P_o \pm Y_x^2 - \left[\frac{3}{2} P_o f_2 \right]^2 \quad \text{Presión de Colapso}$$

$$\sigma_z = \omega_3 P_i \pm Y_x^2 - \left[-\frac{3}{2} P_i f_2 \right]^2 \quad \text{Presión interna}$$

Se calcula para diferentes presiones internas y externas, considerando los límites de la gráfica.

Pi	σz	Po	σz
0.000	95000.000	0.000	95000.000
1334.405	98310.661	-1255.549	89893.080
2668.810	100804.354	-2511.099	84064.149
4003.215	102448.329	-3766.648	77487.738
5337.619	103182.869	-5022.198	70117.899
6672.024	102911.649	-6277.747	61881.843
8006.429	101482.994	-7533.297	52668.036
9340.834	98651.542	-8788.846	42303.375
10675.239	93990.180	-10044.396	30505.474
12009.644	86641.831	-11299.945	16767.329
13344.049	0.000	-12555.495	0.000
13344.049	0.000	-12555.495	0.000
12009.644	-19791.249	-11299.945	-102267.329
10675.239	-34567.441	-10044.396	-106505.474
9340.834	-46656.645	-8788.846	-108803.375
8006.429	-56915.940	-7533.297	-109668.036
6672.024	-65772.437	-6277.747	-109381.843
5337.619	-73471.499	-5022.198	-108117.899
4003.215	-80164.802	-3766.648	-105987.738
2668.810	-85948.669	-3766.648	-105987.738
1334.405	-90882.819	-1255.549	-99393.080
0.000	-95000.000	0.000	-95000.000

Elipse de esfuerzos triaxiales para una TRC-95 35#



Calculando la elipse de esfuerzos triaxiales para la N-80 :

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-5.92}{2} = 0.54 \text{ (pg)}$$

$$r = \frac{D}{t} = \frac{7}{0.54} = 12.9630$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)} = 7.0233 \text{ (pg)}$$

$$r_o = 3.5 \text{ (pg)} \quad r_i = 2.96 \text{ (pg)}$$

$$\omega_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.5^2}{3.5^2 - 2.96^2} = 3.5116$$

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7.0233 = 6.0823$$

$$\omega_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{2.96^2}{3.5^2 - 2.96^2} = 2.5116$$

Limites de la grafica para diferentes presiones:

$$P_o = \pm \frac{Y_r^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} = \pm \frac{80000^2}{3.5116^2 + 6.0823^2} = 11,390.694 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

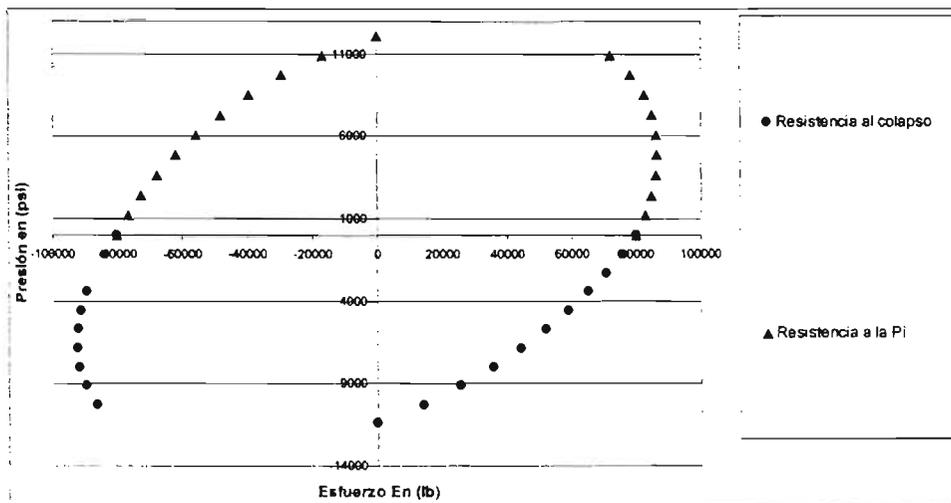
$$P_i = \pm \frac{Y_r^2}{\omega_3^2 + \omega_2^2} = \pm \frac{80000^2}{2.5116^2 + 6.0823^2} = 12,157.108 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

Se calcula para diferentes presiones internas v externas. considerando los limites de la gráfica.

Pi	sz	Po	sz
0.000	80000.000	0.000	80000.000
1215.711	82710.964	-1139.069	75699.435
2431.422	84728.056	-2278.139	70790.862
3647.132	86023.213	-3417.208	65252.832
4862.843	86545.222	-4556.278	59046.652
6078.554	86211.371	-5695.347	52111.026

Pi	sz	Po	sz
7294.265	84891.142	-6834.416	44352.030
8509.975	82372.730	-7973.486	35623.895
9725.686	78285.540	-9112.555	25688.820
10941.397	71878.991	-10251.624	14119.856
12157.108	0.000	-11390.694	0.000
12157.108	0.000	-11390.694	0.000
10941.397	-16917.321	-10251.624	-86119.856
9725.686	-29430.722	-9112.555	-89688.820
8509.975	-39624.764	-7973.486	-91623.895
7294.265	-48250.028	-6834.416	-92352.030
6078.554	-55677.110	-5695.347	-92111.026
4862.843	-62117.814	-4556.278	-91046.652
3647.132	-67702.656	-3417.208	-89252.832
2431.422	-72514.351	-3417.208	-89252.832
1215.711	-76604.112	-1139.069	-83699.435
0.000	-80000.000	0.000	-80000.000

Elipse de esfuerzos triaxiales para una N-80 38#



Calculando la elipse de esfuerzos triaxiales para la P-110

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.004}{2} = 0.498 (pg)$$

$$r = \frac{D}{t} = \frac{7}{0.498} = 14.0562$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{t} \right)^2 = 7.5664 (pg)$$

$$r_o = 3.5 \text{ (pg)}$$

$$r_i = 3.002 \text{ (pg)}$$

$$\omega_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.5^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 3.7832$$

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7.5664 = 6.5527$$

$$\omega_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.002^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 2.7832$$

Limites de la grafica para diferentes presiones:

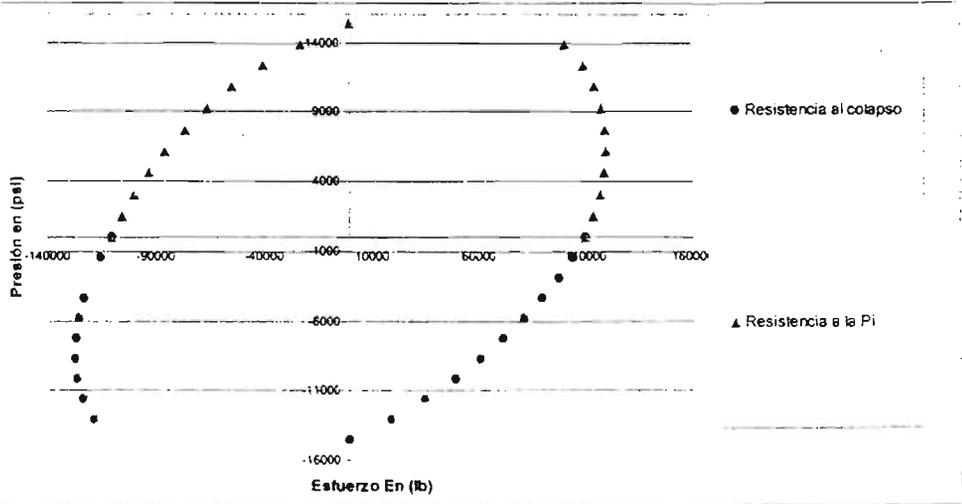
$$P_o = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{110000^2}{3.7832^2 + 6.5527^2}} = 14,537.941 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

$$P_i = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{\omega_3^2 + \omega_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{110000^2}{2.7832^2 + 6.5527^2}} = 15,451.004 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

Se calcula para diferentes presiones internas v externas. considerando los límites de la gráfica.

Pi	sz	Po	sz
0.000	110000.000	0.000	110000.000
1545.100	113833.397	-1453.794	104086.724
3090.201	116720.831	-2907.588	97337.436
4635.301	118624.381	-4361.382	89722.644
6180.402	119474.900	-5815.176	81189.147
7725.502	119160.857	-7268.971	71652.660
9270.602	117506.625	-8722.765	60984.041
10815.703	114228.102	-10176.559	48982.855
12360.803	108830.735	-11630.353	35322.128
13905.903	100322.120	-13084.147	19414.802
15451.004	0.000	-14537.941	0.000
15451.004	0.000	-14537.941	0.000
13905.903	-22916.182	-13084.147	-118414.802
12360.803	-40025.458	-11630.353	-123322.128
10815.703	-54023.484	-10176.559	-125982.855
9270.602	-65902.667	-8722.765	-126984.041
7725.502	-76157.559	-7268.971	-126652.660
6180.402	-85072.262	-5815.176	-125189.147
4635.301	-92822.402	-4361.382	-122722.644
3090.201	-99519.511	-4361.382	-122722.644
1545.100	-105232.737	-1453.794	-115086.724
0.000	-110000.000	0.000	-110000.000

**Elipse de esfuerzos triaxiales para una
P-110 35#**



4. Determinación gráfica de la resistencia de las tuberías por criterio triaxial

Para observar las condiciones de trabajo de una tubería cualitativamente se debe representar simultáneamente, tanto la elipse que representa la resistencia del material, como la trayectoria de cargas de presión vs. carga axial.

Toda condición de carga fuera del contorno de la elipse se dice que esta propiciando una condición de falla.

Ejercicio N° 23⁴

Determinar gráficamente la resistencia de las tuberías del ejercicio N° 17 y ubicar los puntos a las profundidades señaladas.

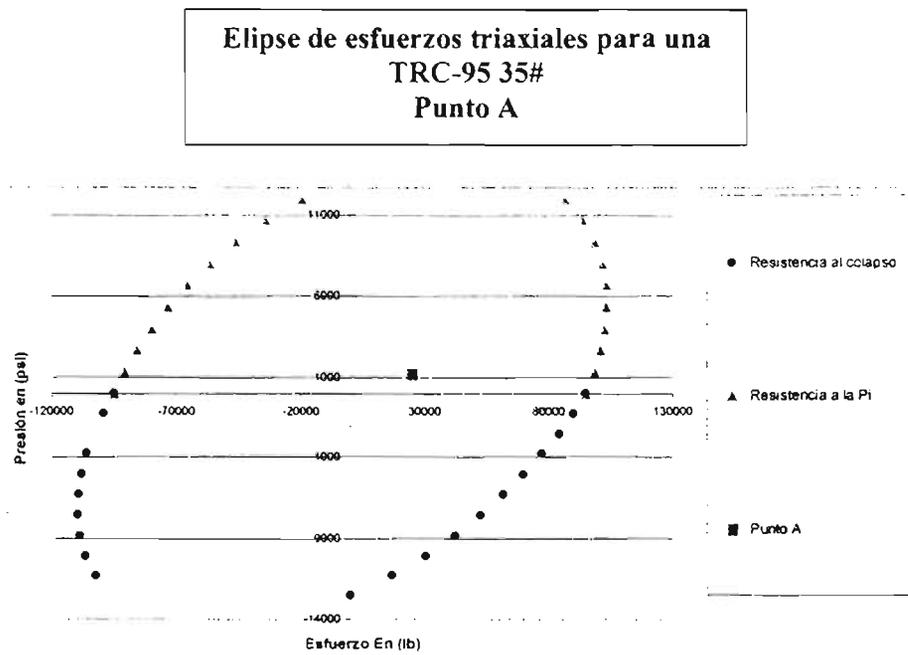
Punto	Profundidad	Diámetro Externo (D)	Grado	Punto de cedencia (Y _t)	peso	Diámetro Interno (d)
	(metros)	(pg)		1000 (lb/pg ²)	Lb _{pic}	(pg)
A	Cabezal	7	TRC	95	35	6.004
B	3000	7	N	80	38	5.92
C, D, E	3100, 4450, 4500	7	P	110	35	6.004

Solución

La elipse de esfuerzos triaxiales se determinó en el ejercicio N° 22.

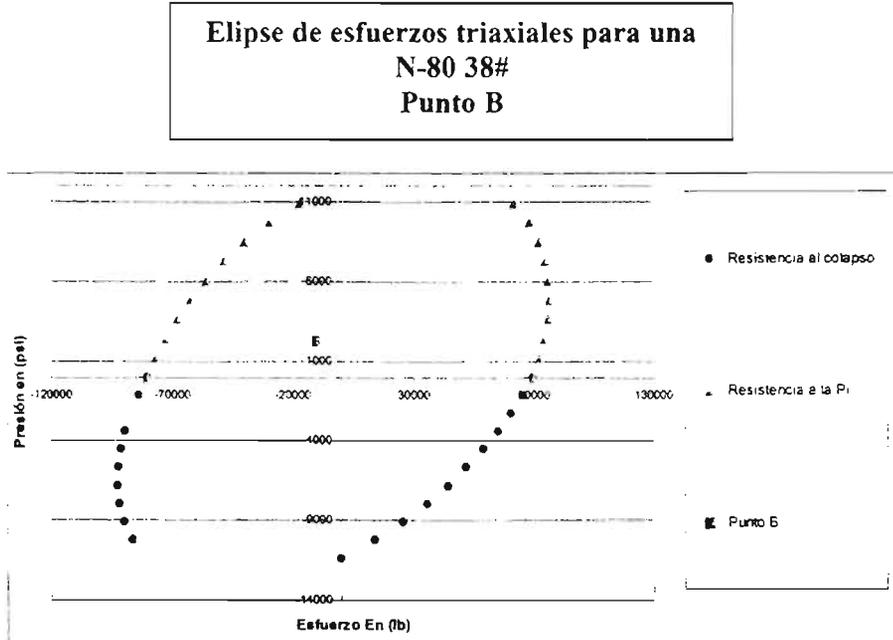
Para ubicar los puntos a las profundidades señaladas y determinar si la tubería resistirá, se necesita calcular la presión equivalente y el esfuerzo axial que se ejercen a cada profundidad. Estos dos parámetros, se calcularon en el ejercicio N° 19 y N° 20 respectivamente.

Graficando el esfuerzo axial contra la presión equivalente a la altura del cabezal (punto A):



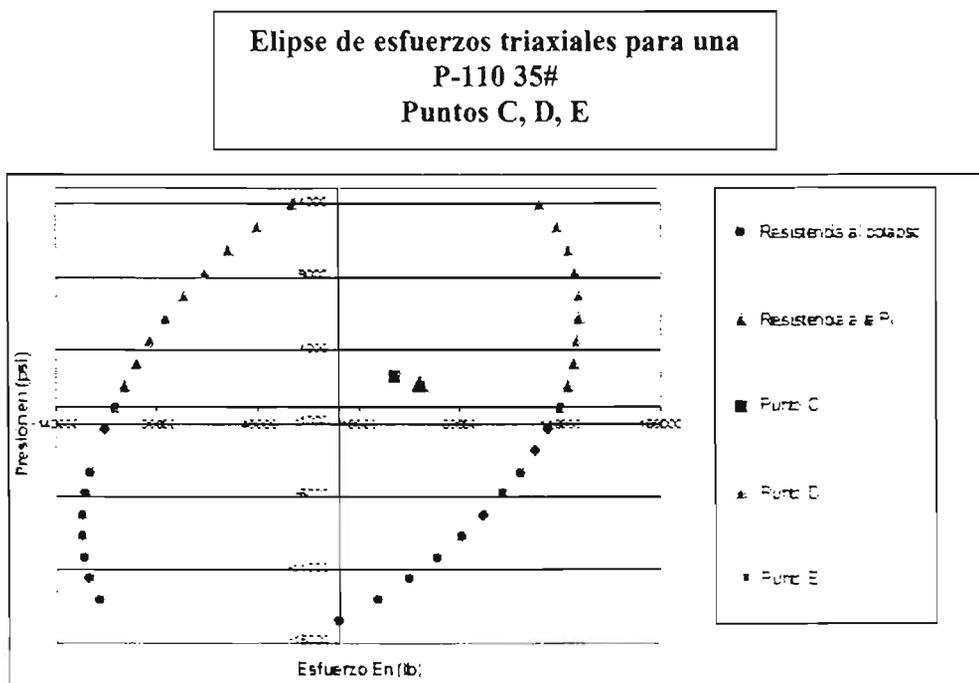
De acuerdo a la ubicación del punto A dentro de la elipse de esfuerzos triaxiales, la tubería TRC-95 si resiste la presión a la altura del cabezal.

Graficando el esfuerzo axial contra la presión equivalente a la profundidad de la cima del cemento (punto B):



De acuerdo a la ubicación del punto B dentro de la elipse de esfuerzos triaxiales. la tubería N-80 si resiste la presión a la profundidad de la cima del cemento

Graficando el esfuerzo axial contra la presión equivalente a la profundidad de la zapata de 10 3/4" (punto C), a la profundidad del intervalo de interés (punto D) y en el fondo del pozo (punto E):



De acuerdo a la ubicación de los puntos C, D y E dentro de la elipse de esfuerzos triaxiales, la tubería P-110 sí resiste la presión a la profundidad de la zapata de 10' 34", a la profundidad del intervalo de interés y en el fondo del pozo.

5. Ejercicios propuestos

Ejercicio N° 1¹

Determinar la resistencia a la presión interna de una tubería de grado N-80, 26.40 (lb/pie) y 7.625 (pg) de diámetro externo. Asumir que tiene un espesor (t) de 0.328 (pg). Usar el mínimo espesor de pared permisible por el API de 0.875. Recalcular el resultado usando el 95% de espesor de pared.

Ejercicio N° 2²

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la presión interna de una tubería J-55, 45.5 (lb/pie) y 10.75 (pg) de diámetro externo.

Ejercicio N° 3¹

Determinar la resistencia a la fuerza de tensión de una tubería N-80, 55(lb/pie) y 10.75 (pg) de diámetro externo. Asumir que tiene un espesor (t) de 0.495 (pg).

Ejercicio N° 4²

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la fuerza de tensión de una tubería J-55, 40.5 (lb/pie) y 10.75 (pg) de diámetro externo.

Ejercicio N° 5¹

Determinar la resistencia a la presión de colapso de una tubería N-80, 47 (lb/pie) y diámetro externo de 9.625 (pg). Asumir un espesor (t) de 0.472 (pg).

Ejercicio N° 6¹

Determinar el diámetro interno y la resistencia a la presión de colapso de una tubería C-95, 47 (lb/pie) y 9.625 (pg) de diámetro externo.

Ejercicio N° 7¹

Determinar la resistencia a la presión de colapso de una tubería P-110, 26 (lb/pie) y 7 (pg) de diámetro externo. Asumir un espesor de 0.362 (pg).

Ejercicio N° 8³

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" N-80 de 26(lb/pie) de 0 a 1000 m, de 1000 m a 3000 m una 7" N-80 de 23(lb/pie) y de 3000 a 4500 m una 7" N-80 de 26(lb/pie). La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000m, la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x7"10M para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T.R. intermedia de 10 3/4" N-80 de 51(lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm³), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm³). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m. La presión de fractura de la formación a 4450 m es de 801 (kg/cm²).

Con la finalidad de introducir el aparejo de producción se realizó un cambio de fluidos colocando dentro de la T. R. de explotación agua dulce.

Determinar la presión externa aplicada en la tubería de explotación a la altura del cabezal, a la profundidad de la cima de cemento, a la profundidad de la zapata de 10 3/4", a la profundidad del intervalo de interés y en el fondo del pozo.

¹ Neal J., Adams, Drilling Engineering: a complete well planning approach, 1ª E. D. Penn Well Books, 1985, págs. 364, 368, 370, 372

² Buorgovne Jr., Adam T., et al. Applied Drilling Engineering, 2ª ED., E.U.A..SPE, 1991, pág. 349

³ Apuntes del curso de Terminación y Reparación de Pozos impartido por el Ingeniero Martin Terrazas Romero, semestre 2004-2.

Ejercicio N° 9

Continuando con el ejercicio N° 8, calcular la presión interna aplicada en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Ejercicio N° 10

Continuando con el ejercicio N° 8, determinar la presión equivalente aplicada en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Ejercicio N° 11

Continuando con el ejercicio N° 8, determinar el esfuerzo de cedencia que se encuentra aplicado en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Ejercicio N° 12

Continuando con el ejercicio N° 8, determinar el esfuerzo triaxial que se encuentra aplicado en la tubería de explotación a las mismas profundidades.

Ejercicio N° 13

Determinar la elipse de esfuerzos triaxiales para las tuberías del ejercicio N° 8

Ejercicio N° 14

Determinar gráficamente la resistencia de las tuberías del ejercicio N° 8 y ubicar los puntos a las profundidades señaladas.

CAPÍTULO

II

Determinación del Cambio de Longitud del Aparejo de Producción

Capítulo II. Determinación del cambio de longitud del aparejo de producción

Las condiciones bajo las cuales trabaja una tubería en el interior de un pozo son variadas y de magnitud considerada. Las cargas principales que se presentan en un pozo y que actúan sobre la tubería son: cargas axiales, cargas de presión, cargas torsionales, cargas no axiales, corrosión y flexión.

Las cargas axiales se producen inicialmente por la acción natural de los efectos gravitacionales. Debido a que los tubos se introducen en el interior de un pozo lleno de fluido de control, se debe considerar el efecto de flotación. Después de la introducción el estado de cargas axiales se ve alterado por efecto de los cambios de presión y/o temperatura que se suscitan al cambiar de densidad el fluido de control y al efectuar operaciones que demandan presión, por lo que se generan efectos axiales que provocan un cambio de longitud en la T. P., como: baloneo, pistoneo y buckling y efectos axiales por la acción del cambio de temperatura.

1. Determinación del efecto de pistoneo

La condición elástica que caracteriza a las tuberías de acero da lugar a la deformación axial. Es decir, por cada incremento de carga axial, la tubería experimenta un cambio longitudinal. Este fenómeno de deformación elástica en la que se manifiesta una relación de elongación y de esfuerzos axiales queda representada por la Ley de Hooke ⁸:

"Sea una barra de un material elástico, de longitud L y sección recta A , sometida a una fuerza axial F de tensión o compresión, que produce una deformación e :

*el esfuerzo unitario es $\sigma = F/A$
la deformación unitaria es $\epsilon = e/L$*

La ley de Hooke se expresa:

$$\frac{\text{esfuerzo unitario}}{\text{deformación unitaria}} = \text{constante} = \frac{\sigma}{\epsilon} = E$$

E es la constante elástica del material, a tensión o compresión y se llama módulo de elasticidad o de Young (para el acero 3×10^7 lb/pg²).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{FL}{Ae} \qquad e = \frac{FL}{AE}$$

La deformación de la barra es directamente proporcional a la fuerza F y a la longitud L , e inversamente proporcional a la sección recta A y al módulo de Young.

El módulo de Young o de elasticidad E puede definirse como el esfuerzo que produce una deformación unitaria.

La fuerza debida al pistón (F_p) ⁹, es el efecto acumulativo de la fuerza que empuja los sellos fuera del empacador y la fuerza que empuja los sellos dentro del empacador. Por ejemplo cuando el diámetro interno de la T. P. es menor que el diámetro interno del empacador (Fig. 1), un incremento de presión en la T. P. resultará en una fuerza hacia arriba (+) y un incremento de presión en el espacio anular resultará en una fuerza hacia abajo (-):

Por lo tanto se tienen dos fuerzas actuando en una misma dirección, pero de sentido contrario.

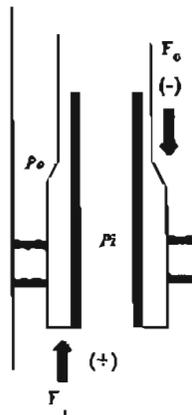


Fig. 1 Distribución de fuerzas y presiones al nivel del empacador

La fórmula que resuelve el efecto de pistoneo es:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s}$$

donde:

ΔL : Acortamiento de la tubería por efecto de pistoneo (pie, m)

L: Longitud de la T. P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

$$A_s = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$$

D: Diámetro externo de la T.P. (pg)

d: Diámetro interno de la T.P. (pg)

F_r : Fuerza resultante (lb)

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o)$$

donde:

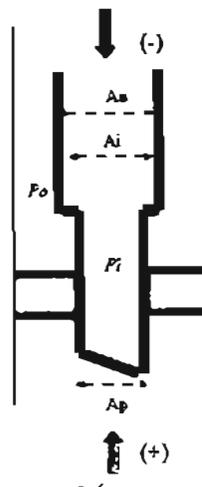
A_p : Área interior del empacador (pg)

A_i : Área interior de la T. P. (pg²)

A_o : Área exterior de la T. P. (pg²)

P_i : Presión interna de la T. P. (lb/pg²)

P_o : Presión externa de la T. P. (lb/pg²)



Ejercicio N° 1

Considerar un aparejo de producción de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie) (d= 2.9"), un empacador 415-01 80-44 y el Baker anclado a 3300 m.

Determinar el acortamiento o elongación del aparejo debido al efecto de pistoneo cuando se efectúa un trabajo de fracturamiento, considerando un gradiente de fractura de 0.8 (lb/pg²) pie; el intervalo a fracturar se encuentra entre 3600 – 3625 metros.

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido en el espacio anular 1 gr/cm³

Solución

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} \quad \dots(1)$$

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.9^2) = 3.016$$

Calculando la Fuerza resultante (F_r):

$$F_r = P_i(A_p - A_s) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4} (4.4)^2 = 15.2 (\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (3.5)^2 = 9.621 (\text{pg}^2)$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.9)^2 = 6.6 (\text{pg}^2)$$

Calculando la presión interna (P_i):

$$P_i = P_{3300 \text{ metros}} + P_{\text{inyección}} \quad \dots(3)$$

Donde la presión a 3300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería (ρ_{fluido} = 1 gr/cm³) a la profundidad del empacador.

$$P_{3300 \text{ metros}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 3300 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 4.692.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(4)$$

Calculando la presión de inyección (P_{inyección}):

$$P_{\text{inyección}} = P_{\text{fractura}} - P_{\text{fluido}} \quad \dots(5)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_f = G_{fractura} * h = 0.8 \left[\frac{lb / pg^2}{pie} \right] * 3600[m] * 3.28 \left[\frac{pie}{m} \right] = 9,446.7 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \dots(6)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido en el espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 3600[m]}{10} * 14.22 = 5,119.2 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \dots(7)$$

Sustituyendo (6) y (7) en (5):

$$P_{inyeccion} = 9446.7 - 5119.2 = 4,327.5 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \dots(5')$$

Sustituyendo (4) Y (5') en (3):

$$P_i = 4692.6 + 4327.5 = 9,020.1 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empujador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 3300[m]}{10} * 14.22 = 4,692.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 9020.1(15.2 - 6.6) - 4692.6(15.2 - 9.621) = 51,388.152 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{EA} = \frac{(3300) * 3.28 * (51388.152)}{(3 \times 10^{-7}) * 3.016} = -6.14$$

$$\Delta L = -6.14 \text{ (pies)}$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 6.14 pies.

Ejercicio N° 2 *

Continuando con el ejercicio N° 1 determinar la presión necesaria a aplicar en el espacio anular para anular el efecto de pistoneo.

Solución

Para calcular la presión en el espacio anular necesaria para anular el efecto de pistoneo, utilizamos la ecuación de la Fuerza resultante, pero igualándola con cero.

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o)$$

$$0 = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o)$$

Despejando la presión externa.

$$P_o = \frac{P_i(A_p - A_i)}{(A_p - A_o)}$$

Sustituyendo la presión interna y las áreas calculadas en el ejercicio N° 1:

$$P_o = \frac{9020.1(15.2 - 6.6)}{(15.2 - 9.621)} = 13,901.94 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión necesaria en el espacio anular, para anular el efecto de pistoneo es de 13.901.94 (lb/pg²).

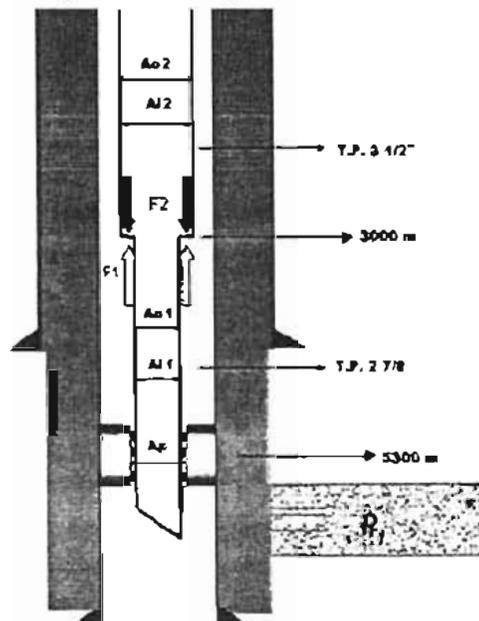
Ejercicio N° 3

Considerar un aparato de producción combinado, con una T. P. de 3 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d=2.9") de 0 a 3000 m, mas una T. P. de 2 7/8" N-80 6.4 (lb/pie) (d=2.441"), un empacador 415-01 80-32 y el Baker anclado a 5300 m.

Determinar el acortamiento o elongación del aparato debido al efecto de pistoneo cuando se efectúa una prueba de admisión represionando la T. P. en superficie con 5500 (lb/pg²).

Datos:

- > Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- > Densidad del fluido en el espacio anular 1 gr/cm³



Solución

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} \quad \dots(1)$$

Debido a que se trata de un aparejo doble, se tendrá que calcular el acortamiento o elongación para cada tubería ver figura.

Tubería de 2 7/8"

Calculando la Fuerza resultante:

$$F_{r,t} = P_i(A_p - A_{i1}) - P_o(A_p - A_{o1}) \quad \dots(2)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4}(d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4}(3.2)^2 = 8.04(\text{pg}^2)$$

$$A_{i1} = \frac{\pi}{4}(D)^2 = \frac{\pi}{4}(2.875)^2 = 6.49(\text{pg}^2)$$

$$A_{o1} = \frac{\pi}{4}(d)^2 = \frac{\pi}{4}(2.441)^2 = 4.679(\text{pg}^2)$$

Calculando la presión interna (P_i):

$$P_i = P_{\text{superficie}} + P_{5300\text{-metros}} \quad \dots(3)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 5.500 (lb/pg²) y la presión a 5300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{5300\text{-metros}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5300[m]}{10} * 14.22 = 7.536.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (3):

$$P_i = 5500 + 7536.6 = 13.036.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr.cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5300[m]}{10} * 14.22 = 7.536.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$F_{r1} = 13036.6(8.04 - 4.679) - 7536.6(8.04 - 6.49) = 32.134.28(\text{lb})$$

Calculando el área transversal de la tubería (A_1):

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (2.856^2 - 2.441^2) = 1.726$$

Sustituyendo en (1) para la tubería de 2 7/8":

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{EA_1} = - \frac{(2300) * (32134.28)}{(3 \times 10^7) * 1.726} = -1.42$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento de la tubería de 2 7/8" de 1.42 metros.

Tubería de 3 1/2"

Calculando la Fuerza resultante:

$$F_{r2} = P_o(A_{o2} - A_{o1}) - P_i(A_{i2} - A_{i1}) \quad \dots(4)$$

$$A_{o2} = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (3.5)^2 = 9.62(\text{pg}^2)$$

$$A_{i2} = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.9)^2 = 6.6(\text{pg}^2)$$

Calculando la presión interna (P_i):

$$P_i = P_{\text{superficie}} + P_{3000 \text{ metros}} \quad \dots(5)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 5.500 (lb/pg²) y la presión a 3000 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del cambio de diámetro de la tubería.

$$P_{3000 \text{ metros}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 3000[\text{m}]}{10} * 14.22 = 4.266 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (5):

$$P_i = 5500 + 4266 = 9.766 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del cambio de diámetro de la tubería.

$$P_c = \frac{\left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 3000[m]}{10} * 14.22 = 4,266 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo en (4):

$$F_r = 4266.6(9.62 - 6.49) - 9766(6.6 - 4.67) = -5.493.9(lb)$$

Calculando el área transversal de la tubería (A_1):

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.9^2) = 3.01$$

Sustituyendo en (1) para la tubería de 3 1/2":

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{EA_1} = - \frac{(3000) * (-5493.9)}{(3 \times 10^7) * 3.01} = 0.182$$

El efecto de pistoneo provoca un alargamiento de la tubería de 3 1/2" de 0.182 (m).

El cambio de longitud total del aparejo es igual a:

$$\Delta L_{total} = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$\Delta L_{total} = -1.42 + 0.182 = -1.238(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.238 metros.

2. Determinación del efecto de baloneo

El cambio de presión dentro o fuera de la T. P. provocado por el cambio en la densidad de los fluidos, por trabajos de estimulación, por el cierre del pozo o simplemente por la producción, pueden provocar un cambio en la longitud de la T. P. por efecto de baloneo. Este efecto se presenta cuando la presión interna es mayor que la presión en el espacio anular y se calcula con la siguiente ecuación ¹:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (m)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta \rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (gr/cm³)

$\Delta \rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (gr/cm³)

ξ : Caída de presión en la tubería debida al flujo (lb/pg²)/pie

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

R: Relación de diámetros

$$R = \frac{D}{d}$$

Para un material determinado y para esfuerzos dentro de cierto límite, la relación entre las deformaciones unitarias transversal y longitudinal es una constante que se llama *relación de Poisson*. La relación de Poisson (μ), es un número abstracto, ya que es la relación entre dos deformaciones unitarias. La deformación transversal es producida por la deformación longitudinal. Para materiales isótropos, que son aquellos que presentan las mismas propiedades en todas direcciones $\mu=0.25$ y para el acero $\mu=0.3$.

La caída de presión en la tubería debida al flujo (ξ), se considera una constante y es positiva cuando el flujo es de abajo de la T. P.. El peor caso para el acortamiento por efecto de baloneo es cuando ξ es igual a cero.

Ejercicio N° 4 ⁴

Considerar un aparejo de producción de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) ($d=3.92$ "), con empacador 415-01 80-32 para una T.R. de 7 5/8" 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4300 m.

Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de baloneo cuando se efectúa una prueba de admisión represionando la T. P. en superficie con 8500 (lb/pg²).

Datos:

- > Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- > Densidad del fluido por el espacio anular 1 gr/cm³

Solución

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(1)$$

Calculando la relación de diámetros (R):

$$R = \frac{D}{d} = \frac{4.5(pg)}{3.92(pg)} = 1.1479$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = 0$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 8,500 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 8,500 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (1) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right)$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(4300)}{3 \times 10^7} \cdot \left(\frac{8500}{(1.1479)^2 - 1} \right) = -2.3(m)$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 2.3 metros.

Ejercicio N° 5

Continuando con el ejercicio N° 4, determinar la presión necesaria a aplicar en el espacio anular para anular el efecto de baloneo.

Solución

Para anular el efecto de baloneo es necesario que la presión interna sea igual a la presión en el espacio anular.

$$P_i = P_o \quad \dots(1)$$

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{superficie} + P_{hidrostatica} \quad \dots(2)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 8,500 (lb/pg²) por que se está represionando la T. P., y la presión hidrostática es la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería de producción ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{hidrostatica} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 6.114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$P_i = 8500 + 6114.6 = 14.614.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión externa (P_o) a la altura del empacador es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{anular} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1):

$$P_{espacio_anular} = P_i - P_o = 14614.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] = 8,500 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión necesaria para anular el efecto de baloneo es de 8,500 (lb/pg²).

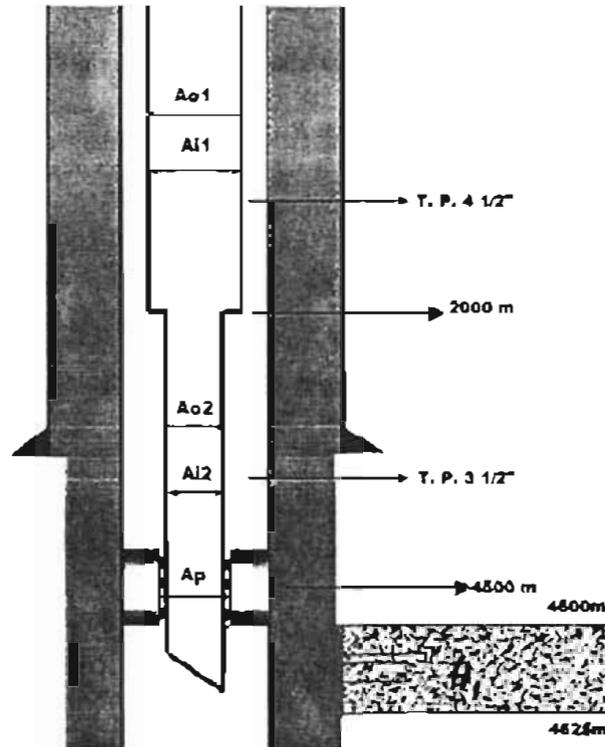
Ejercicio N° 6 *

Considerar un aparejo de producción combinado, con una T. P. de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d=3.92") de 0 a 2000 m. más una T. P. de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie), un empacador 415-01 80-32 para T.R. de 7 5/8" N-80 39 (lb/pie) (d= 6.625") y el Baker anclado a 4500 m.

Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de baloneo cuando se efectúa un trabajo de fracturamiento. el gradiente de fractura es de 0.90 (lb/pg²)/pie, el intervalo a fracturar se encuentra entre 4600 - 4625 metros.

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido en el espacio anular 1 gr/cm³



Solución

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \frac{\Delta P_i}{R^2-1}}{R^2-1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2-1} \right) \quad \dots(1)$$

Calculando la presión de inyección:

$$P_{inyeccion} = P_{fractura} - P_{fluido} \quad \dots(2)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_F = G_{fractura} * h = 0.9 \left[\frac{lb}{pie} \right] * (4600[m]) * 3.28 \left[\frac{pie}{m} \right] = 13,579.2 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido en el espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{\left[\frac{gr}{cc} \right] * 4600[m]}{10} * 14.22 = 6,541.2 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$P_{\text{atmosférica}} = 13579.2 - 6541.2 = 7.038 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Debido a que se trata de un aparejo doble, se tendrá que calcular el acortamiento o elongación para cada tubería ver figura.

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = 0$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 7.038 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 7.038 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (1) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right)$$

Tubería de 4 1/2"

Calculando la relación de diámetros (R):

$$R = \frac{D}{d} = \frac{4.5(\text{pg})}{3.92(\text{pg})} = 1.1479$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(2000)}{3 \times 10^{-7}} \left(\frac{7038}{(1.1479)^2 - 1} \right) = -0.886(m)$$

El efecto de baloneo en la tubería de 4 1/2" provoca un acortamiento de 0.886 metros.

Tubería de 3 1/2"

Calculando la relación de diámetros (R):

$$R = \frac{D}{d} = \frac{3.5(\text{pg})}{2.992(\text{pg})} = 1.1697$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(2500)}{3 \times 10^7} \cdot \left(\frac{(7038)}{(1.1697)^2 - 1} \right) = -0.9557(m)$$

El efecto de baloneo en la tubería de 3 1/2" provoca un acortamiento de 0.9557 metros.

El cambio de longitud total del aparejo es igual a:

$$\Delta L_{total} = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$\Delta L_{total} = -0.886 - 0.9557 = -1.8417(m)$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.8417 metros.

3. Determinación del efecto de buckling

Se le llama efecto de buckling a la deformación de la tubería en forma de espirales por el efecto de una fuerza compresiva en la parte inferior de la tubería.

Si esta fuerza es lo suficientemente grande, la parte inferior de la tubería se buclea. Esta compresión decrece con la distancia desde el fondo y se vuelve nula en el punto neutro



La distancia "n" del fondo de la tubería al punto neutro se define por:

$$n = \frac{r}{10}$$

Donde F es una fuerza ficticia que se presenta cuando la tubería está sujeta a presión interna y presión externa.

$$F = A_r (P_i - P_o)$$

La tubería se buclea solo si la fuerza ficticia es positiva ($P_i > P_o$); si es negativa o igual a cero la tubería no se buclea.

Y w es el peso de la tubería en presencia de otros líquidos (lb/pie):

$$w = w_t + w_i - w_o$$

donde:

w_t = Peso de la tubería por unidad de longitud (lb/pie)

w_i = Peso del fluido del interior por unidad de longitud (lb/pie)

w_o = Peso del fluido del exterior por unidad de longitud (lb/pie)

Cuando n es menor a la longitud total de la tubería, se considera que parte de la tubería está bucleada y se utiliza la siguiente ecuación para calcular su variación en longitud.

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{2 E A_r} \dots (5)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)
w: Peso de la tubería (lb/pie)
e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)
r: Claro radial (pg³)

$$r = \frac{D_{intTR} - d_{ExtTP}}{2}$$

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64}\right)(D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64}\right)(4.5^4 - 3.92^4) = 8.53[\text{pg}^4]$$

Cuando n es mayor que la longitud total de la tubería se considera que toda la tubería esta bucleada y se utiliza la siguiente ecuación para calcular su variación en longitud.

$$\Delta L = -\frac{r^2 F^2}{8\epsilon I w} \frac{Lw}{F} \left(2 - \frac{Lw}{F}\right)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)
w: Peso de la tubería (lb/pie)
L: Longitud (m o pie)
e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)
r: Claro radial (pg³)
I: Momento inercial (pg⁴)

La distancia entre los espirales, conocida como pitch se define por:

$$Pitch = \pi \sqrt{\frac{8\epsilon I}{F}}$$

Ejercicio N° 7^a

Considerar un aparejo de producción de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (D= 3.92"), un empacador 4 1/2-01 80-32 para T. R. de 7 5/8" 39 (lb/pie) (d= 6.625") y el Baker anclado a 4300 metros. Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de Buckling cuando se efectúa una prueba de admisión represionando la T. P. en superficie con 8500 (lb/pg²).

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido por el espacio anular 1 gr/cm³

Solución

Para determinar si existe efecto de buckling debemos calcular la presión interna y la presión externa a la altura del empacador.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{superficie} + P_{hidrostatica} \quad \dots(1)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 8,500 (lb/pg²) por que se está represionando la T. P., y la presión hidrostática es la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería de producción ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_{\text{hidrostatica}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 8500 + 6114.6 = 14,614.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión externa (P_o) a la altura del empacador es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots(2)$$

Calculando la Fuerza ficticia (lb):

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(3)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4} (3.2)^2 = 8.04 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = 8.04 (\text{pg}^2) * \left(14614.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 68,361.05 [\text{lb}] \dots(3')$$

Calculando el peso de la tubería (lb/pie):

$$w = w_1 + w_2 - w_3 \dots(4)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_1) es:

$$w_1 = 13.5 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(5)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_i A_i \quad \dots(6)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (3.92^2) = 12.06 (pg^2)$$

Sustituyendo en (6):

$$w_i = 0.43 * \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 12.06 (pg^2) = 5.18 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(6')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \quad \dots(7)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D^2) = \frac{\pi}{4} (4.5^2) = 15.9 (pg^2)$$

Sustituyendo en (7):

$$w_o = 0.43 * \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 15.9 (pg^2) = 6.837 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(7')$$

Sustituyendo (5) (6') y (7') en (4):

$$w = 13.5 + 5.18 - 6.837 = 11.843 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(4')$$

Sustituyendo (3') y (4') en (2):

$$n = \frac{68361.05 [lb]}{11.843 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 5,772.27 [ft] = 1,759.38 [m]$$

Cuando $n < L$ ($1,759.38 < 4,500$) como en este caso, se considera que parte de la tubería está bucleada, y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \epsilon l w} \quad \dots(5)$$

Calculando el claro radial (pg^2):

$$r = \frac{D_{INTR} - d_{EXTP}}{2} = \frac{6.625 - 4.5}{2} = 1.06 [pg]$$

Calculando el momento inercial :

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (4.5^4 - 3.92^4) = 8.53 [pg^4]$$

Sustituyendo en (5):

$$\Delta L = - \frac{(1.06[\text{pg}])^2 * (68361.05[\text{lb}])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) * (8.53[\text{pg}^4]) * \left(11.843 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \right)} = -0.216[\text{pies}]$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.216 pies o 0.0658 metros.

Ejercicio N° 8

Continuando con el ejercicio N° 7 determinar la presión necesaria a aplicar en el espacio anular para anular el efecto de buckling.

Solución

Para anular el efecto de buckling es necesario que la presión interna sea igual a la presión en el espacio anular.

$$P_i = P_o$$

$$P_{\text{espacio_anular}} = P_i - P_o = 14614.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] = 8,500 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión necesaria para anular el efecto de buckling es de 8,500 (lb/pg²).

Ejercicio N° 9

Continuando con el ejercicio N° 7 determinar el número de espirales que se generan por el efecto de buckling.

Solución

Calculando el número de espirales:

$$N_{\text{esp}} = \frac{n}{\text{pitch}} \quad \dots(1)$$

Donde el punto neutro (n) se calculó en el ejercicio N° 7 y el pitch se calcula:

$$\text{Pitch} = \pi \frac{\overline{8El}}{F} \quad \dots(2)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (4.5^4 - 3.92^4) = 8.53[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (2):

$$Pitch = \pi \frac{8(3 \cdot 10^7)(8.53[\rho g^4])}{68340[lb]} = 543.74[\rho g] = 45.31[ft]$$

Sustituyendo en (1):

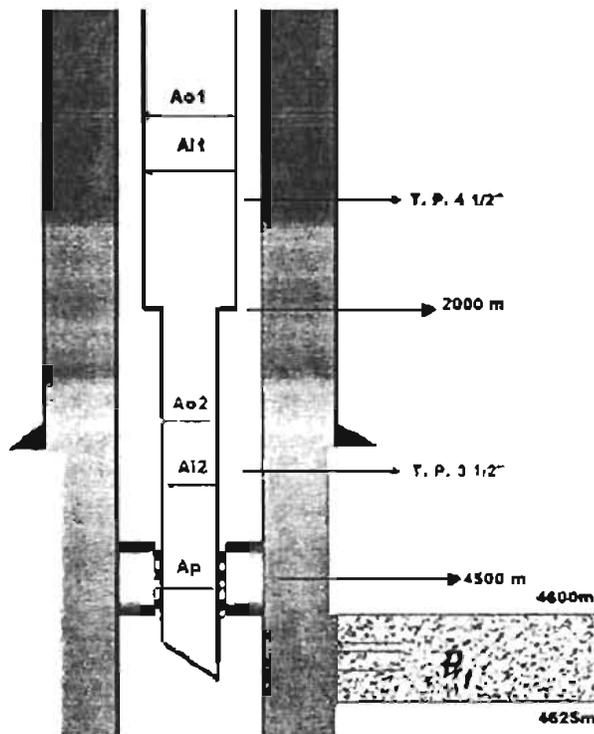
$$N_{esp} = \frac{5772.27[ft]}{45.31[ft]} = 127.39[espirales]$$

Ejercicio N° 10

Considerar un aparato de producción combinado, con una T. P. de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d=3.92") de 0 a 2000 m, más una T. P. de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie), un empacador 415-01 80-32 para T.R. de 7 5/8" N-80 39 (lb/pie) (d=6.625") y el Baker anclado a 4500 m. Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de buckling cuando se efectúa un trabajo de fracturamiento, el gradiente de fractura es de 0.90 (lb/pg²)/pie, el intervalo a fracturar se encuentra entre 4600 - 4625 metros.

Datos:

- > Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- > Densidad del fluido en el espacio anular 1 gr/cm³



Solución

Para determinar si existe efecto de buckling debemos calcular la presión interna y la presión externa a la altura del empacador.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4500_metros} + P_{inyección} \quad \dots(1)$$

Donde la presión a 4500 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4500_metros} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4500 [m]}{10} * 14.22 = 6.399 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{inyección}$):

$$P_{inyección} = P_{fractura} - P_{fluido} \quad \dots(3)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_f = G_{fractura} * h = 0.9 \left[\frac{\text{lb} / \text{pg}^2}{\text{pie}} \right] * 4600 [m] * 3.28 \left[\frac{\text{pie}}{m} \right] = 13,579.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(4)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido en el espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4600 [m]}{10} * 14.22 = 6,541.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(5)$$

Sustituyendo (4) y (5) en (3):

$$P_{inyección} = 13579.2 - 6541.2 = 7,038 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(3')$$

Sustituyendo (2) y (3') en (1):

$$P_i = 6399 + 7038 = 13,437 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4500 [m]}{10} * 14.22 = 6.399 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots(6)$$

Calculando la fuerza ficticia (lb):

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(7)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4} (3.2)^2 = 8.04(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (7):

$$F = 8.04(\text{pg}^2) * \left(13437 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6399 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 56.585.5[\text{lb}] \dots(7')$$

Calculando el peso de la tubería (lb/pie):

$$w = w_t + w_f - w_o \dots(8)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_t) es:

$$w_t = 9.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(9)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_f A_i \dots(10)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (2.99^2) = 7.021(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (10):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 7.021(\text{pg}^2) = 3.02 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(10')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \dots(11)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D^2) = \frac{\pi}{4} (3.5^2) = 9.62(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (1):

$$w_w = 0.43 * 1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] = 9.62 (pg^2) = 4.13 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (9) (10') y (11') en (8):

$$w = 9.2 + 3.02 - 4.13 = 8.09 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(8')$$

Sustituyendo (7') y (8') en (6):

$$n = \frac{56585.5 [lb]}{8.09 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 6.994.49 [ft] = 2.131.92 [m]$$

Como $n < L$ (1.553.52 < 2500) el punto neutro se encuentra dentro de la tubería de 3 1/2", por lo que su variación de longitud se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 E I \pi}$$

Calculando el claro radial (pg^2):

$$r = \frac{D_{INTR} - d_{EXTR}}{2} = \frac{6.625 - 3.5}{2} = 1.5625 [pg]$$

Calculando el momento inercial :

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (3.5^4 - 2.99^4) = 3.44 [pg^4]$$

Sustituyendo en (5):

$$\Delta L = - \frac{(1.5625 [pg])^2 * (56585.5 [lb])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) * (3.44 [pg^4]) * \left(8.09 \left[\frac{lb}{pie} \right] \right)} = -1.1703 [pies]$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de -1.1703 pies ó 0.3567 metros.

4. Diámetro de paso de herramientas bajo efecto de buckling

Es importante mencionar que el efecto de buckling es una deformación que puede hacer fallar a una tubería. Esto ocurre por que se generan grandes esfuerzos por flexión en forma simultánea.

Dada la curvatura de la tubería que se alcanza por el efecto de buckling, esta limita el trabajo o paso de herramientas por el interior de la tubería. Para determinar si una herramienta pasa a través de una tubería bucleada, se debe calcular el radio de curvatura que se define de la siguiente manera:

$$R = \frac{\text{Pitch}}{2}$$

Donde el pitch es la distancia que hay entre los espirales de la tubería, y se define:

$$\text{Pitch} = \pi \sqrt{\frac{8EI}{F}}$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

E: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

I: Momento inercial (pg⁴)

A continuación se presenta un ejemplo para determinar el paso de herramientas bajo efecto de buckling.

Ejercicio N° 11

Considerar un aparejo de producción de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie) (d=2.9"), un empacador 415-01 80-44 para una tubería de explotación de 7 5/8" N-80 39 (lb/pie) (d=6.625"), y el Baker anclado a 3300 m. tanto la tubería de producción como el espacio anular se encuentran llenos de agua.

Se programaron tres corridas ya que usted ordenó disparar el intervalo de 3600 a 3625 metros con pistolas de 2 1/8" de diámetro externo y con una longitud de 8 m.

La presión en la cabeza del pozo se incrementó a 8500 (lb/pg²) después de que se disparó el intervalo de 3625-3637 m.

Determinar si después de disparar sale la pistola o se atora en el aparejo, y si se atora ¿en que parte del aparejo se atoraría?

Solución

Para determinar si la pistola se atora necesitamos comprobar si existe buckling por lo que debemos calcular la presión interna y la presión externa a la altura del empacador.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{\text{superficie}} + P_{\text{hidrostática}} \quad \text{---(1)}$$

Donde la presión en la superficie es igual a 8.500 (lb/pg²) y la presión hidrostática es la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería de producción ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$), a la profundidad del empacador.

$$P_{hidrostática} = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 3300 [m]}{10} * 14.22 = 4,692.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 8500 + 4692.6 = 13,192.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión externa (P_o) a la altura del empacador es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 3300 [m]}{10} * 14.22 = 4,692.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Calculando el punto neutro:

$$n = \frac{F}{w} \dots(2)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(3)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{empacador})^2 = \frac{\pi}{4} (4.4)^2 = 15.20 (pg^2)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = 15.20 (pg^2) * \left(13192.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] - 4692.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) = 129,200 [lb]$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_f - w_o \dots(4)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 9.2 \left[\frac{lb}{pie} \right] \dots(5)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_f) es:

$$w_f = 0.43 \rho_i A_i \dots(6)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \left(\frac{\pi}{4}\right)(2.9[\text{pg}])^2 = 6.60(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (6):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 6.60(\text{pg}^2) = 2.84 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(6')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \quad \dots(7)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(3.5^2) = 9.62(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (7):

$$w_o = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 9.62(\text{pg}^2) = 4.136 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(7')$$

Sustituyendo (5) (6') y (7') en (4):

$$w = 9.2 + 2.84 - 4.136 = 7.904 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2):

$$n = \frac{129200[\text{lb}]}{7.904 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]} = 16,346.15[\text{ft}] = 4,982.30[\text{m}]$$

Cuando $n > L$ ($4,982.30 > 3,300$), como en este caso, se considera que toda la tubería esta bucleada, y se deberá calcular el radio de curvatura para determinar si la pistola se atora o no:

$$R = \frac{\text{Pitch}}{2} \quad \dots(8)$$

tal que:

$$\text{Pitch} = \pi \sqrt{\frac{8eI}{F}} \quad \dots(9)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64}\right)(D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64}\right)(3.5^4 - 2.9^4) = 3.89[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (9):

$$\text{Pitch} = \pi \sqrt{\frac{8(3 \cdot 10^7)(3.89)}{129200}} = 267[\text{pg}] = 6.78[\text{m}]$$

Sustituyendo en (8):

$$R = \frac{6.78}{2} = 3.39[\text{m}]$$

Como el radio de curvatura es menor que la longitud de la pistola esta se atora. Como toda la tubería esta bucleada la pistola se atoraría en el primer esoidal arriba del empacador. esto es a 3.39 metros.

Para evitar que la pistola se atore. es necesario anular el efecto buckling.

El efecto buckling se anula igualando la presión interna con la presión en el espacio anular.

$$P_i = P_o$$

$$P_{\text{espacio_anular}} = P_i - P_o = 13192.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 4192.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] = 9,000 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión necesaria a aplicar en el espacio anular para anular el efecto de buckling es de 9,000 (lb/pg²).

5. Efectos combinados

Para determinar el acortamiento o elongación del aparejo durante alguna operación que se haya realizado o se vaya a realizar en el pozo, se debe considerar el cambio de longitud total de la T. P. producto del esfuerzo que generan los diferentes efectos sobre la tubería. Para determinar este cambio de longitud total de la T. P. se suman algebraicamente los tres efectos:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}}$$

Los acortamientos o elongaciones de la T. P. van a depender de la operación que se este realizando en el pozo, por ejemplo, cuando se esta realizando una estimulación, todos los efectos producen encogimiento de la tubería, sin embargo hay ocasiones en las que algunos efectos van a provocar acortamiento y otros alargamiento por ejemplo durante el vaciado del pozo.

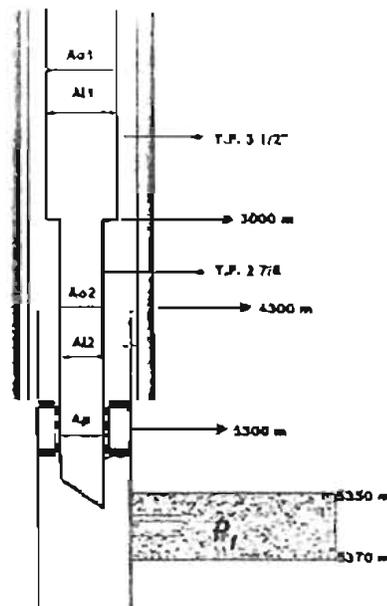
Ejercicio N° 12 *

Considerar un aparejo de producción de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie) (d=2.9") de 0 a 3000m, más una T. P. de 2 7/8" 6.4 (lb/pie) (d=2.441"), un empacador 415-01 80-32 y el Baker anclado a 5300 m. en una tubería de explotación de 7 5/8" N-80 39 (lb/pie) (d=6.625") con boca de Linner a 4300 m de 5 1/2" 26 (lb/pie) (d=4.548"), en un inicio tanto la tubería de producción como el espacio anular se encuentran llenos de agua.

Usted ordenó disparar el intervalo 5350- 5370 m con pistolas de 1 1/16" 13 C/M. Con una longitud de 8 m por lo que se programaron tres corridas.

Durante los trabajos, se disparo todo el intervalo programado, al terminar los disparos observo 5500 (lb/pg²) de presión en T. P., posteriormente abrió el pozo por estrangulador de 1/16" de pulgada observando una presión de 3500 (lb/pg²) y un gasto de aceite de 1500 BPD la temperatura de flujo en superficie es de 80 ° C y su densidad del hidrocarburo es de 0.79 (gr/cm³), posteriormente abrió el pozo por 1/8" de pulgada registrando una presión de 2000 (lb/pg²) y un gasto de 3500 BPD la temperatura de flujo en superficie es de 100 ° C. La densidad del fluido dentro de la T.P. es de 1 (gr/cm³) y la densidad del fluido por el espacio anular es de 1 (gr/cm³).

Determinar el acortamiento o elongación del aparejo por baloneo, buckling y pistoneo cuando terminó de disparar el intervalo.



Solución

Calculando la presión interna (P_i):

$$P_i = P_{\text{superficie}} + P_{5300\text{-metros}} \quad \dots(1)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 5,500 (lb/pg^2) y la presión a 5300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_{5300\text{-metros}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5300[\text{m}]}{10} * 14.22 = 7,536.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 5500 - 7536.6 = 13036.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_e):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cc}$) a la profundidad del empacador.

$$P_e = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5300[\text{m}]}{10} * 14.22 = 7,536.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_e), existe *buckling*.

Efecto de Buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \quad \dots(2)$$

Calculando la fuerza ficticia (lb):

$$F = A_p (P_i - P_e) \quad \dots(3)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4} (3.2)^2 = 8.04 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = 8.04 (\text{pg}^2) * \left(13036.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 7536.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 44.220 [\text{lb}] \quad \dots(3')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_1 + w_i - w_o \quad \dots(4)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_1) es:

$$w_1 = 6.4 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(5)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_v A_i \quad \dots(6)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (2.441^2) = 4.68 (pg^2)$$

Sustituyendo en (6):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4.68 (pg^2) = 2.01 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(6')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_v A_o \quad \dots(7)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (2.875^2) = 6.491 (pg^2)$$

Sustituyendo en (7):

$$w_o = 0.43 * 1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 6.491 (pg^2) = 2.791 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(7')$$

Sustituyendo (5) (6') y (7') en (4):

$$w = 6.4 + 2.01 - 2.791 = 5.619 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(4')$$

Sustituyendo (3') y (4') en (2):

$$n = \frac{44,220 [lb]}{5.619 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 7.869.72 [ft] = 2.398.69 [m]$$

El punto neutro se mide del fondo del pozo hacia arriba, por lo que todo el liner está bucleado. toda la tubería de 2 7/8" está bucleada y parte de la tubería de 3 1/2" está bucleada.

La ecuación para determinar el cambio de longitud cuando $n > L$ como en el caso del liner es:

$$\Delta L = -\frac{r^2 F^2 L w}{8 E I w F} \left(2 - \frac{L w}{F} \right) \dots (8)$$

donde:

- F: Fuerza ficticia (lb)
- w: Peso de la tubería (lb/pie)
- L: Longitud (m)
- e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)
- r: Claro radial (pg²)

$$r = \frac{D_{IntTR} - d_{ExtTR}}{2} = \frac{4.548 - 2.875}{2} = 0.8365 [\text{pg}]$$

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (2.875^4 - 2.441^4) = 1.6109 [\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (8):

$$\Delta L = -\frac{(0.8365(\text{pg}))^2 \cdot (44220(\text{lb}))^2}{8 \cdot \left(3 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) \right) \cdot (1.6109(\text{pg}^4)) \cdot (5.619(\text{lb/pie}))} \left[\frac{(1000(\text{m})) \cdot (5.619(\text{lb/pie}))}{44220(\text{lb})} \left[2 - \frac{(1000(\text{m})) \cdot (5.619(\text{lb/pie}))}{44220(\text{lb})} \right] \right]$$

$$\Delta L = -0.1495(\text{m})$$

De acuerdo a la localización del punto neutro, se concluyó que la tubería de 2 7/8" estaba completamente bucleada, por lo que se utilizará la siguiente ecuación

$$\Delta L = -\frac{r^2 F^2 L w}{8 E I w F} \left(2 - \frac{L w}{F} \right) \dots (10)$$

donde:

- F: Fuerza ficticia (lb)
- w: Peso de la tubería (lb/pie)
- e: Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)
- r: Claro radial (pg²)

$$r = \frac{D_{IntTR} - d_{ExtTR}}{2} = \frac{6.625 - 2.875}{2} = 1.875 [\text{pg}]$$

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (2.875^4 - 2.441^4) = 1.6109 [\text{pg}^4]$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = - \frac{(1.875(\text{pg}))^2 \cdot (25898.74(\text{lb}))^2}{8 \cdot \left(3 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}\right]\right) \cdot (1.6109(\text{pg}^4)) \cdot (5.619(\text{lb}/\text{pie}))} \cdot \left[\frac{(1300(\text{m})) \cdot (5.619(\text{lb}/\text{pie}))}{25898.74(\text{lb})} - \frac{(1300(\text{m})) \cdot (5.619(\text{lb}/\text{pie}))}{25898.74(\text{lb})} \right]$$

$$\Delta L = -0.51(\text{m})$$

Para la tubería de 3 1/2" se utilizara la ecuación, para cuando $n < L$, ya que solo 98.7 metros de la tubería estan bucleados.

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \epsilon / w} \dots (11)$$

Calculando el claro radial (pg^2):

$$r = \frac{D_{\text{INT}} - d_{\text{EXT}}}{2} = \frac{6.625 - 2.992}{2} = 1.8165[\text{pg}]$$

Calculando el momento inercial (I):

$$I = \left(\frac{\pi}{64}\right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64}\right) (2.875^4 - 2.992^4) = 3.432[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (11):

$$\Delta L = - \frac{(1.8165[\text{pg}])^2 \cdot (2081.1[\text{lb}])^2}{8 \left(3 \cdot 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}\right]\right) \cdot (3.432[\text{pg}^4]) \cdot (5.619 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}}\right])} = -0.00308[\text{pies}]$$

$$\Delta L = -0.00093(\text{m})$$

El cambio de longitud total del aparejo por el efecto de buckling es igual a:

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_{\text{buckling}} + \Delta L_{\text{2}} + \Delta L_{\text{3}}$$

$$\Delta L_{\text{total}} = -0.1495 - 0.7531 - 0.00091 = -0.9035(\text{metros})$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.9035 metros.

Efecto de Pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = - \frac{L F_r}{\epsilon A_t} \dots (11)$$

L: Longitud de la T.P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg^2)

A_t : Área transversal de la tubería (pg^2)

F_r : Fuerza resultante (lb)

Debido a que se trata de un aparejo doble, se tendrá que calcular el acortamiento o elongación para cada tubería.

Tubería de 2 7/8"

Calculando la Fuerza resultante:

$$F_{r1} = P_i(A_p - A_{i1}) - P_o(A_p - A_{o1}) \quad \dots(12)$$

donde

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{empaculador})^2 = \frac{\pi}{4} (3.2)^2 = 8.04 (\text{pg}^2)$$

$$A_{o1} = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (2.875)^2 = 6.49 (\text{pg}^2)$$

$$A_{i1} = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.679 (\text{pg}^2)$$

La presión interna (P_i) y la presión externa, se calcularon anteriormente.

Sustituyendo:

$$F_{r1} = 13036.6(8.04 - 4.679) - 7536.6(8.04 - 6.49) = 32,134.28(\text{lb})$$

Calculando el área transversal:

$$A_s = \left(\frac{\pi}{4} \right) (D^2 - d^2) = \left(\frac{\pi}{4} \right) (2.875^2 - 2.441^2) = 1.81 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (11) para la tubería de 2 7/8":

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(2300) * (32134.28)}{(3 \times 10^7) * 1.81} = -1.36$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento de la tubería de 2 7/8" de 1.36 metros.

Tubería de 3 1/2"

Calculando la Fuerza resultante:

$$F_{r2} = P_o(A_{o2} - A_{o1}) - P_i(A_{i2} - A_{i1}) \quad \dots(13)$$

$$A_{o2} = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (3.5)^2 = 9.62 (\text{pg}^2)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.9)^2 = 6.6 (\text{pg}^2)$$

Calculando la presión interna (P_i):

$$P_i = P_{\text{superficie}} + P_{3000 \text{ metros}} \quad \dots(14)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 5.500 (lb/pg²) y la presión a 3000 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería (ρ_{fluido} = 1 gr/cc) a la profundidad del cambio de diámetro de la tubería.

$$P_{3000 \text{ metros}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 3000 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 4.266 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (14):

$$P_i = 5500 + 4266 = 9.766 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_e):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular (ρ_{fluido} = 1 gr/cc) a la profundidad del cambio de diámetro de la tubería.

$$P_e = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 3000 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 4.266 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (13):

$$F_p = 4266.6(9.62 - 6.49) - 9766(6.6 - 4.679) = -5.493.9 (\text{lb})$$

Sustituyendo en (11) para la tubería de 3 1/2":

$$\Delta L = - \frac{LF_p}{EA_1} = - \frac{(3000) * (-5493.9)}{(3.1 \cdot 10^{-7}) * 1.81} = 0.3035$$

El efecto de pistoneo provoca un alargamiento de la tubería de 3 1/2" de 0.3035 (m).

El cambio de longitud total del aparejo por el efecto de pistoneo es igual a:

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_1 + \Delta L_2 \quad \dots(15)$$

$$\Delta L_{\text{total}} = -1.36 + 0.3035 = -1.0565 (\text{m})$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.0565 metros.

Efecto de balanceo:

Calculando el efecto de balanceo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(16)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (m)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta \rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (gr/cm³)

R: Relación de diámetros

$\Delta \rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (gr/cm³)

ξ : Caída de presión en la tubería debido al flujo (lb pg²/pie)

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

Debido a que se trata de un aparejo doble, se tendrá que calcular el acortamiento o elongación para cada tubería.

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1$ [gr/cm ³]	$\rho_{i2} = 1$ [gr/cm ³]	$\Delta \rho_i = 0$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1$ [gr/cm ³]	$\rho_{o2} = 1$ [gr/cm ³]	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0$ [lb/pg ²]	$P_{i2} = 5,500$ [lb/pg ²]	$\Delta P_i = 5,500$ [lb/pg ²]
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0$ [lb/pg ²]	$P_{o2} = 0$ [lb/pg ²]	$\Delta P_o = 0$ [lb/pg ²]

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (16) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right) \dots(17)$$

Tubería de 2 7/8 "

Calculando la relación de diámetros (R):

$$R = \frac{D}{d} = \frac{2.875(\text{pg})}{2.441(\text{pg})} = 1.1777$$

Sustituyendo en (17):

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(2300)}{3 \times 10^7} \cdot \left(\frac{(5500)}{(1.1777)^2 - 1} \right) = -0.6537(m)$$

El efecto de baloneo en la tubería de 2 7/8" provoca un acortamiento de -0.6537 metros.

Tubería de 3 1/2 "

Calculando la relación de diámetros (R):

$$R = \frac{D}{d} = \frac{3.5(\text{pg})}{2.9(\text{pg})} = 1.206$$

Sustituyendo en (17):

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(3000)}{3 \times 10^7} \cdot \left(\frac{(5500)}{(1.206)^2 - 1} \right) = -0.7261(m)$$

El efecto de baloneo en la tubería de 3 1/2" provoca un acortamiento de 0.7261 metros.

El cambio de longitud total del aparejo por el efecto de pistoneo es igual a:

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$\Delta L_{\text{total}} = -0.6537 - 0.7261 = -1.3798(m)$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.3798 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo cuando se terminó de disparar el intervalo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.9035 - 1.0565 - 1.3798 = -3.3398[m] \approx -10.95(\text{pies})$$

El cambio de longitud total debida a los tres efectos es un acortamiento de 3.3398 metros.

5. Ejercicios propuestos

Ejercicio N° 1

Considerar un aparato de producción de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) ($d=3.92''$), con empacador 415-01 80-32 para una T.R. de 7 5/8" 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4300 m.

Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de pistoneo cuando se efectúa una prueba de admisión represionando la T. P. en superficie con 8500 (lb/pg²). Tanto la tubería de producción como el espacio anular se encuentran llenos de agua.

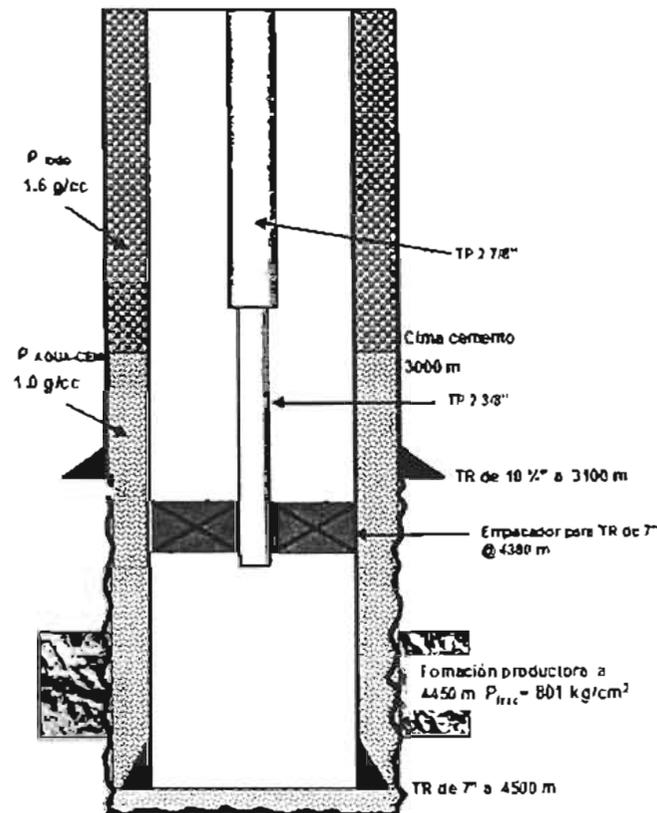
Ejercicio N° 2

Continuando con el ejercicio N° 1 determinar la presión necesaria a aplicar en el espacio anular para anular el efecto de pistoneo.

Ejercicio N° 3

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" N-80 de 26(lb/pie) de 0 a 1000 m. de 1000 m a 3000 m una 7" N-80 de 23(lb/pie) y de 3000 a 4500 m una 7" N-80 de 26(lb/pie). La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000m. la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 1/2" 5M x 7" 10M para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T.R. intermedia de 10 3/4" N-80 de 51(lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm³), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm³). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m. La presión de fractura de la formación a 4450 m es de 801 (kg/cm²).

Determinar el acortamiento o elongación del aparato por efecto de baloneo, cuando se está realizando una de admisión realizada con agua dulce, alcanzando al presión de fractura de la formación considerando un aparato de producción combinado de 2 7/8" TRC-95 8.6 (lb/pie) de 0 a 2200 metros y una T. P. de 2 3/8" P-110 4.6 (lb/pie) de 2200 a 4380, con empacador ($d=1.9''$) anclado a 4380 metros.



Ejercicio N° 4

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar el acortamiento o elongación por el efecto de pistoneo, durante el vaciado del pozo.

Ejercicio N° 5

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar el acortamiento o elongación por el efecto de buckling, durante el vaciado del pozo.

Ejercicio N° 6

Continuando con el ejercicio N° 4 determinar el número de espirales que se generaron por el efecto de buckling, la distancia entre cresta y cresta, el diámetro y la longitud de la herramienta que puede pasar a través del buckling, durante el vaciado del pozo.

Ejercicio N° 7

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar el acortamiento y la elongación resultante por los efectos combinados de Bukling, Pistoneo y Baloneo, con el pozo disparado, cerrado y lleno con aceite.

CAPÍTULO III

Fuerzas Térmicas Aplicadas a las Tuberías

Capítulo III. Fuerzas térmicas aplicadas a las tuberías

En los capítulos anteriores analizamos las cargas por presión que se generan en las tuberías por el efecto de la presión hidrostática de los fluidos, actuando tanto en el interior como en el exterior del tubo. Además, se manifiestan diferentes cargas de presión por efecto del flujo de fluidos durante las operaciones de la perforación y terminación, tales como: cementación, circulación, perforado, inducción estimulación, producción, etc. Cada una de las operaciones propician también un cambio en las condiciones térmicas, por lo que el efecto de cambio de temperatura está también vinculado con los cambios de presión, dando como resultado un cambio en las cargas axiales.

El enfriamiento de la T. P. provoca un acortamiento sobre la T. P., y el calentamiento provoca una elongación. Por cada grado Fahrenheit que se incrementa o disminuye, la longitud de la tubería varía un 0.0000069 (pg) por cada pulgada.

I. Efecto de temperatura en tuberías de producción

La ecuación que resuelve el cambio de longitud por efecto de temperatura es ¹:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \beta L \Delta T \quad \dots(1)$$

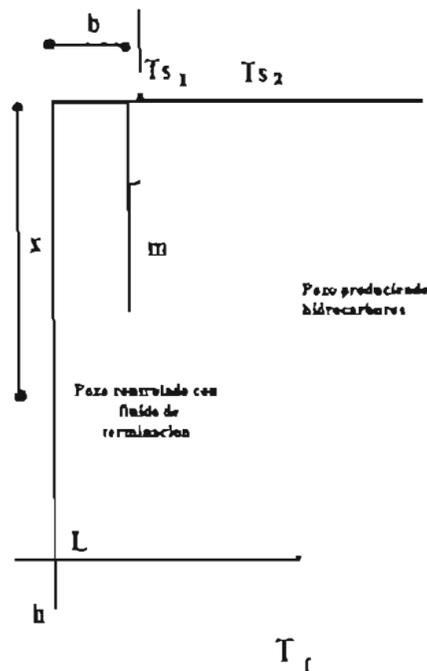
donde:

β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (\text{°F}^{-1})$

L: Longitud de la T. P. (metros)

ΔT : Diferencial de temperatura (° F)

Esta ecuación parte del hecho de que el perfil de temperaturas lineal puede ser expresado como la ecuación de una recta de la forma $Y = mx + b$ la cual nos representará la temperatura a cualquier profundidad.



Donde la temperatura inicial del pozo controlado con fluido de terminación a cualquier profundidad es:

$$T_{inicial} = \frac{(T_f - T_{s1})}{L} * x + T_{s1} \quad \dots(2)$$

Y la temperatura final del pozo produciendo hidrocarburos es:

$$T_{final} = \frac{(T_f - T_{s2})}{L} * x + T_{s2} \quad \dots(3)$$

Por lo tanto el ΔT de la ecuación (1) es:

$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial} \quad (4)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (4):

$$\Delta T = \underbrace{\left(\frac{T_f - T_{s2}}{L}\right)}_A x + T_{s2} - \underbrace{\left(\frac{T_f - T_{s1}}{L}\right)}_B x - T_{s1} \quad \dots(5)$$

Nos queda:

$$f(\Delta T) = Ax + T_{s2} - Bx - T_{s1}$$

Si sustituimos esta ecuación en:

$$\Delta L_T = \int_0^L \beta f(\Delta T) dx \quad \dots(6)$$

Sustituyendo e integrando la ecuación:

$$\begin{aligned} &= \int_0^L \beta (Ax + T_{s2} - Bx - T_{s1}) dx \\ &= \beta \left[A \int_0^L x dx + T_{s2} \int_0^L dx - B \int_0^L x dx - T_{s1} \int_0^L dx \right] \\ &= \beta \left\{ A \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^L + T_{s2} [x]_0^L - B \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^L - T_{s1} [x]_0^L \right\} \\ &= \beta \left\{ A \left(\frac{L^2}{2} \right) + T_{s2}(L) - B \left(\frac{L^2}{2} \right) - T_{s1}(L) \right\} \\ &= \beta \left\{ \left(\frac{T_f - T_{s2}}{L} \right) \left(\frac{L^2}{2} \right) + T_{s2}(L) - \left(\frac{T_f - T_{s1}}{L} \right) \left(\frac{L^2}{2} \right) - T_{s1}(L) \right\} \\ &= \beta \left\{ \left(\frac{T_f - T_{s2}}{2} \right) L + T_{s2}(L) - \left(\frac{T_f - T_{s1}}{2} \right) L - T_{s1}(L) \right\} \\ &= \beta \left\{ \left(\frac{T_f}{2} \right) L - \left(\frac{T_{s2}}{2} \right) L + T_{s2}(L) - \left(\frac{T_f}{2} \right) L + \left(\frac{T_{s1}}{2} \right) L - T_{s1}(L) \right\} \\ &= \beta \left\{ \left(\frac{T_{s2}}{2} \right) L - \left(\frac{T_{s1}}{2} \right) L \right\} \end{aligned}$$

Esta ecuación nos permite calcular la temperatura a cualquier profundidad.

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1})$$

Ejercicio N° 1 4

Considerar una tubería de producción de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d= 3.92") con empacador 415-01 80-32 y el Baker anclado a 4300 m.

Determinar el acortamiento o elongación de la tubería por el efecto de temperatura cuando se efectúa una prueba de admisión represionando la T. P. en superficie con 8500 (lb pg²). La temperatura antes de iniciar la prueba es de 120° F y la temperatura del agua es de 70° F.

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido por el espacio anular 1 gr/cm³

Solución

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots(1)$$

donde:

β: Coeficiente de expansión térmica 69 x 10⁻⁷ (°F⁻¹)

L: Longitud de la T. P. (metros)

T_{s2}: Temperatura superficial después de la prueba (°F)

T_{s1}: Temperatura superficial antes de la prueba (°F)

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 4300)}{2} (70 - 120) = -0.74175 \text{ (metros)}$$

El efecto de temperatura provoca un acortamiento de la tubería de 0.74175 metros.

Ejercicio N° 2

Continuando con el ejercicio N° 1 determinar la fuerza a la que está sometida la tubería producto del cambio de temperatura.

Solución

Calculando la fuerza debida al cambio de temperatura a partir de la ley de Hooke:

$$\Delta L = - \frac{LF}{EA_s} \dots(1)$$

Despejando la fuerza de la ecuación (1):

$$\Delta F = - \frac{EA_s}{L} \Delta L \dots(2)$$

donde:

ΔF : Fuerza incremental resultante del cambio de temperatura (lb)

L: Longitud de la T. P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

ΔL : Cambio de longitud de la T. P. (m)

A_t : Área transversal de la tubería (pg²)

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Tal que:

D: Diámetro externo de la T. P. (pg)

d: Diámetro interno de la T. P. (pg)

Calculando el área transversal (A_t):

$$A_t = \frac{\pi}{4} (4.5^2 - 3.92^2) = 3.835$$

Sustituyendo en (2):

$$\Delta F = - \frac{3 \times 10^7 * 3.835}{4300} * (-0.7417) = 19.844.78 (lb)$$

La fuerza producto del cambio de temperatura es de 19, 844.78 lbs de tensión, sin embargo hay que destacar que solo se manifiesta si la tubería esta agarrada en ambos extremos: en el caso contrario se manifiesta como elongación o contracción.

Ejercicio N° 3⁴

Considerar una tubería de producción de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie) (d= 2.9") con empacador 415-01 80-32 para T. R. de 7 5/8 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4500 metros.

Determinar el acortamiento o elongación de la tubería por el efecto de temperatura cuando se efectúa un trabajo de fracturamiento, el gradiente de fractura es de 0.90 (lb/pg²) pie. el intervalo a fracturar está entre 4600-4625 metros. La temperatura en la superficie es de 150° F y la temperatura de la gelatina de fractura es de 65° F.

Datos:

- > Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- > Densidad del fluido por el espacio anular 1 gr/cm³

Solución

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots (1)$$

donde:

β : Coeficiente de expansión térmica 69×10^{-7} (°F⁻¹)

L: Longitud de la T. P. (metros)

T_{s2} : Temperatura superficial después de la prueba (°F)

T_{s1} : Temperatura superficial antes de la prueba (°F)

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 4500)}{2} (65 - 150) = -1.3196 \text{ (metros)}$$

El efecto de temperatura provoca un acortamiento de la tubería de 1.3196 metros.

Ejercicio N° 4

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar la fuerza a la que está sometida la tubería producto del cambio de temperatura.

Solución

Calculando la fuerza debida al cambio de temperatura a partir de la ley de Hooke:

$$\Delta L = -\frac{LF}{\epsilon A_s} \quad \dots(1)$$

Despejando la fuerza de la ecuación (1):

$$\Delta F = -\frac{\epsilon A_s}{L} \Delta L \quad \dots(2)$$

donde:

ΔF : Fuerza incremental resultante del cambio de temperatura (lb)

L: Longitud de la T. P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

ΔL : Cambio de longitud de la T. P. (m)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.9^2) = 3.0159$$

Sustituyendo en (2):

$$\Delta F = -\frac{3 \times 10^7 * 3.0159}{4500} * (-1.3196) = 26,531.87 \text{ (lb)}$$

La fuerza producto del cambio de temperatura es de 26. 531.87 lbs de tensión. sin embargo hay que destacar que solo se manifiesta si la tubería esta agarrada en ambos extremos: en el caso contrario se manifiesta como elongación o contracción.

Ejercicio N° 5

Se tiene un pozo controlado con fluido de terminación. la tubería de producción es de 2 3/8" 46 # I. D. 2" y tiene una longitud de 10.000 pies. la temperatura superficial es de 60 °F. Después de inducir el pozo se estabilizó con un gasto de aceite de 2000 BPD y la temperatura que se registró en la superficie fue de 100 °F.

Determinar el acortamiento o elongación de la tubería por el efecto de temperatura.

Solución

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots (1)$$

donde:

β : Coeficiente de expansión térmica 69×10^{-7} ($^{\circ}\text{F}^{-1}$)

L: Longitud de la T. P. (pies)

T_{s2} : Temperatura superficial después de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

T_{s1} : Temperatura superficial antes de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 10000)}{2} (100 - 60) = 1.38 \text{ (pies)}$$

El efecto de temperatura provoca una elongación de la tubería de 1.38 pies.

Ejercicio N° 6

Continuando con el ejercicio N° 5 determinar la fuerza a la que está sometida la tubería producto del cambio de temperatura.

Solución

Calculando la fuerza por el cambio de temperatura a partir de la ley de Hooke:

$$\Delta L = - \frac{LF}{EA_s} \dots (1)$$

Despejando la fuerza de la ecuación (1):

$$\Delta F = - \frac{EA_s}{L} \Delta L \dots (2)$$

donde:

ΔF : Fuerza incremental resultante del cambio de temperatura (lb)

L: Longitud de la T.P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

ΔL : Cambio de longitud de la T. P. (m)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (2.375^2 - 2^2) = 1.288$$

Sustituyendo en (2):

$$\Delta F = - \frac{3 \times 10^7 * 1.288}{10000} * (1.38) = -5.332.32 \text{ (lb)}$$

La fuerza producto del cambio de temperatura es de 5.332.32 lb. de compresión, sin embargo hay que destacar que solo se manifiesta si la tubería esta agarrada en ambos extremos: en el caso contrario se manifiesta como elongación o contracción.

2. Efecto de temperatura en aparejos de producción

La ecuación que resuelve el cambio de longitud por efecto de temperatura es: ¹

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \beta L \Delta T \quad \dots(1)$$

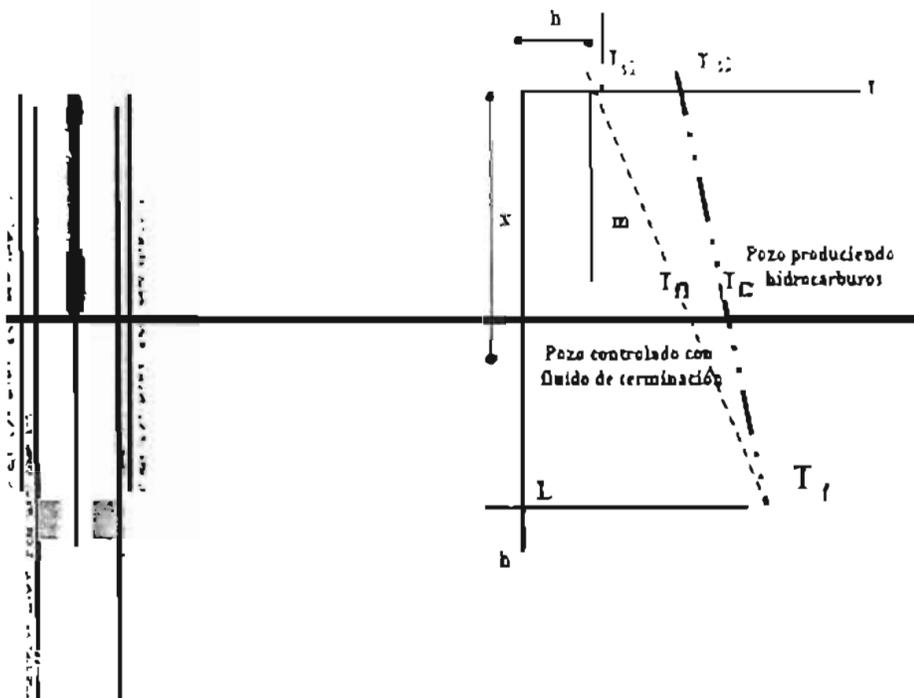
donde:

β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (^{\circ}\text{F}^{-1})$

L: Longitud de la T. P. (metros)

ΔT : Diferencial de temperatura ($^{\circ}\text{F}$)

En este caso el perfil de temperaturas seguirá siendo lineal y puede ser expresado como la ecuación de una recta de la forma $Y = mx - b$ la cual nos representará la temperatura a cualquier profundidad.



Donde la temperatura inicial del pozo controlado con fluido de terminación es:

$$T_{\text{inicial}} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{L} \cdot x + T_{s1} \quad \dots(2)$$

Y la temperatura final del pozo produciendo hidrocarburos es:

$$T_{\text{final}} = \frac{(T_{f2} - T_{s2})}{L} \cdot x + T_{s2} \quad \dots(3)$$

Por lo tanto el ΔT de la ecuación (1) es:

$$\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}} \quad (4)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (4):

$$\Delta T = \frac{(T_{f2} - T_{s2})}{L} * x + T_{s2} - \frac{(T_{f1} - T_{s1})}{L} * x - T_{s1}$$

Si sustituimos esta ecuación en (1):

$$\Delta LT = \beta \int (\Delta T) dx$$

Nos queda de la siguiente forma:

$$\Delta LT = \beta \int \left(\frac{(T_{f2} - T_{s2})}{L} x + T_{s2} - \frac{(T_{f1} - T_{s1})}{L} x - T_{s1} \right) dx \dots (6)$$

Sustituyendo e integrando la ecuación (6) nos queda:

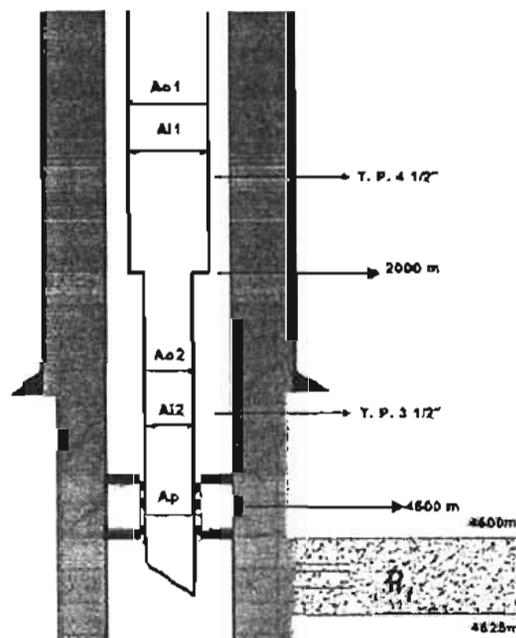
$$\Delta T_{temperatura} = \frac{\beta L}{2} [(T_{f2} - T_{f1}) + (T_{s2} - T_{s1})]$$

Esta ecuación nos permite calcular la temperatura a cualquier profundidad en aparejos de producción combinados.

Ejercicio N° 7⁴

Considere un aparejo de producción combinado con longitud de 2000 metros de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d= 3.92") y el resto de tubería de 3 1/2" N-80 9.2 (lb/pie) con empacador 415-01 80-32 para T. R. de 7 5/8" N-80 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4500 metros.

Determinar el efecto de temperatura sobre el aparejo de producción cuando se efectúa un trabajo de fracturamiento, el gradiente de fractura es de 0.90 (lb/pg²)/pie, y el intervalo a fracturar se encuentra entre 4600-4625 metros.



Solución

Calculando el efecto de temperatura:

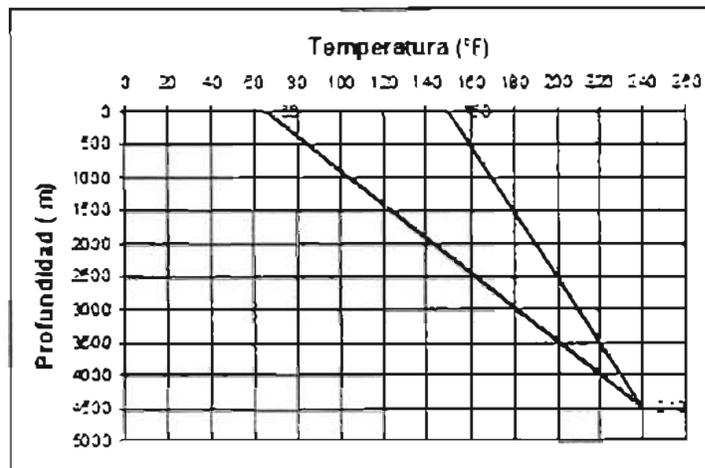
$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{i2} - T_{i1}) \dots (1)$$

donde:

- β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (^{\circ}\text{F}^{-1})$
- L: Longitud de la T. P. (metros)
- T_{i2} : Temperatura superficial después de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)
- T_{i1} : Temperatura superficial antes de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

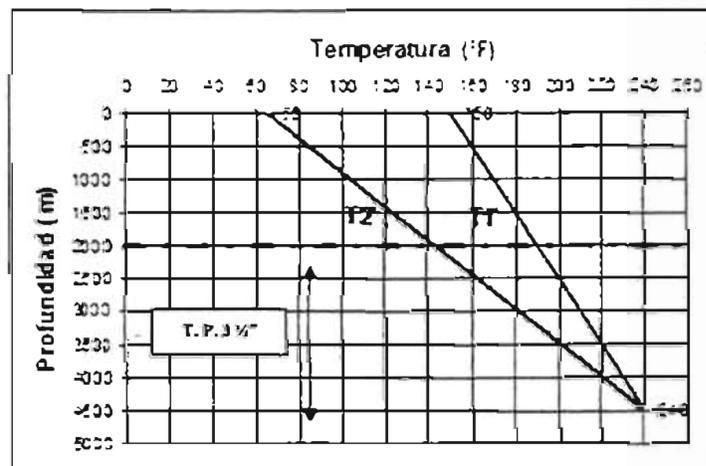
Se supone una temperatura de fondo de 115°C (240°F) debido a que la temperatura se eleva un promedio de 25°C por cada kilómetro.

Tomando del ejercicio N° 3 la temperatura superficial inicial de 150°F y la temperatura de la gelatina de fractura de 65°F , el perfil de temperatura expresando en profundidad vs temperatura es el siguiente:



El perfil de temperaturas puede ser expresado como la ecuación de una recta de la forma $y = mx + b$, la cual nos representara la temperatura a cualquier profundidad.

Tubería de 3 1/2"



Calculando la temperatura superficial inicial:

$$T1' = \left(\frac{T_f - T_{s1}}{L} \right) * x + T_s \quad \dots(2)$$

Sustituyendo en (2):

$$T1' = \left(\frac{240 - 150}{4500} \right) * 2500 + 150 = 200^\circ F$$

Calculando la temperatura superficial final:

$$T2' = \left(\frac{T_f - T_{s2}}{L} \right) * x + T_{s2} \quad \dots(3)$$

Sustituyendo en (3):

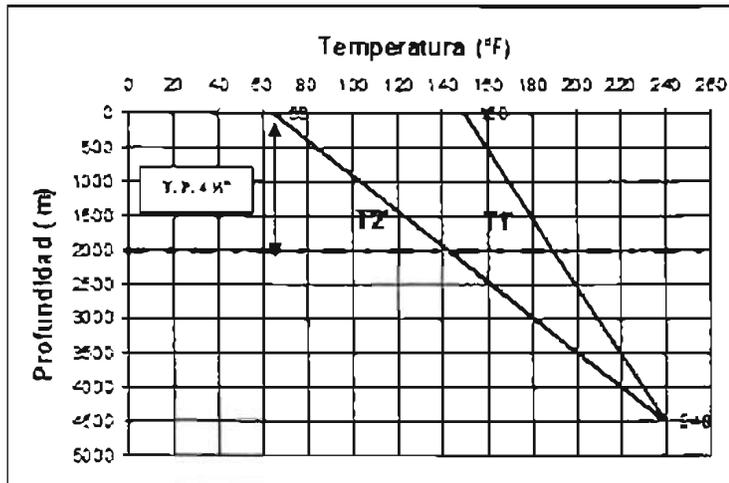
$$T2' = \left(\frac{240 - 65}{4500} \right) * 2500 + 65 = 162.2^\circ F$$

Sustituyendo en (1) para la tubería de 3 1/2":

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 2500)}{2} (162.2 - 200) = -0.326(m)$$

El efecto de temperatura provoca un acortamiento de la tubería de 3 1/2" de 0.326 metros.

Tubería de 4 1/2 "



Sustituyendo en (1) para la tubería de 4 1/2":

$$\Delta L_{\text{temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 2000)}{2} [(162.2 - 200) + (65 - 150)] = -0.84732$$

El efecto de temperatura provoca un acortamiento de la tubería de 4 1/2" de 0.84732 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo debido al efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{3.125} + \Delta L_{4.125}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.326 - 0.84732 = -1.17332 \text{ [m]}$$

El cambio de longitud total del aparejo debido al efecto de temperatura es un acortamiento de 1.17332 metros.

Ejercicio N° 8^a

Continuando con el ejercicio N° 7 determinar la fuerza a la que está sometido el aparejo producto del cambio de temperatura.

Solución

Calculando la fuerza por el cambio de temperatura a partir de la ley de Hooke:

$$\Delta L = -\frac{LF}{EA_s} \quad \dots(1)$$

Despejando la fuerza de la ecuación (1):

$$\Delta F = -\frac{EA_s}{L} \Delta L \quad \dots(2)$$

donde:

ΔF : Fuerza incremental resultante del cambio de temperatura (lb)

L: Longitud de la T. P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

ΔL : Cambio de longitud de la T. P. (m)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

Calculando el área transversal para la tubería de 4 1/2":

$$A_s = \frac{\pi}{4} (4.5^2 - 3.92^2) = 3.8355$$

Sustituyendo en (2) para la tubería de 4 1/2":

$$\Delta F = -\frac{3 \times 10^7 * 3.8355}{2000} * (-0.84732) = 48.748.4 \text{ (lb)}$$

Calculando el área transversal para la tubería de 3 1/2":

$$A_s = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.9^2) = 3.015$$

Sustituyendo en (2) para la tubería de 3 1/2":

$$\Delta F = -\frac{3 \times 10^7 * 3.015}{2500} * (-0.326) = 11.794.68 \text{ (lb)}$$

Calculando la fuerza total a la que esta sometido el aparejo producto del cambio de temperatura:

$$\Delta F_{\text{Total}} = \Delta F_{41.2'} + \Delta F_{31.2'}$$

Sustituyendo:

$$\Delta F_{\text{Total}} = 48748.4 + 11794.68 = 60.543.08[\text{lb}]$$

La fuerza producto del cambio de temperatura es de 60,543.08 lb. de compresión, sin embargo hay que destacar que solo se manifiesta si la tubería esta agarrada en ambos extremos; en el caso contrario se manifiesta como elongación o contracción

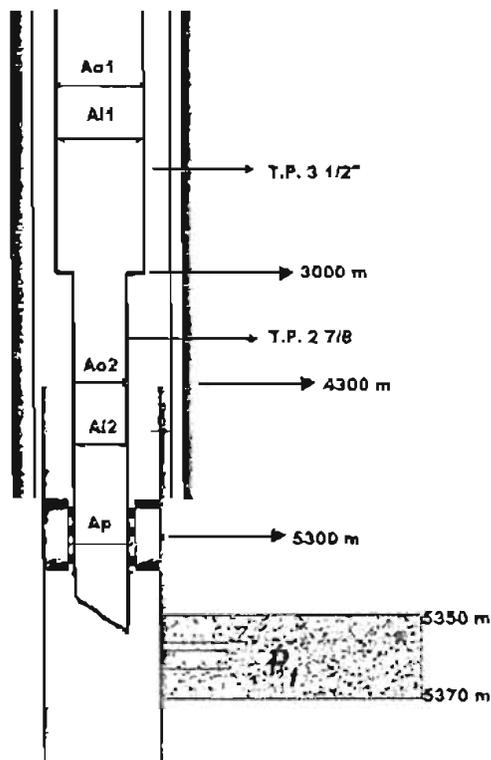
Ejercicio N° 9 *

Considerar un aparejo de producción de 3 1/2" 9.2 (lb/pie) (d= 2.9") de 0 a 3000 m. más una T. P. de 2 7/8" 6.4 (lb/pie) (d= 2.441"). un empacador 415-01 80-32 y el Baker anclado a 5300 m. en una tubería de explotación de 7 5/8" N-80 30 (lb/pie) (d= 6.625") con boca de Linner a 4300m de 5 1/2" 26 (lb/pie) (d= 4.548"), en un inicio tanto al tubería de producción como el espacio anular se encuentran llenos de agua. La temperatura de la formación a disparar es de 180 °C.

Usted ordenó disparar el intervalo 5350- 5370 m con pistolas de 1 1/16" 13 C/M. Con una longitud de 8 m por lo que se programaron tres corridas.

Durante los trabajos, se disparo todo el intervalo programado, al terminar los disparos observe 5500 (lb/pg²) de presión en T. P., posteriormente abrió el pozo por estrangulador de 1/16" de pulgada observando una presión de 3500 (lb/pg²) y un gasto de aceite de 1500 BPD la temperatura de flujo en superficie es de 80 ° C y su densidad del hidrocarburo es de 0.79 (gr/cm³), posteriormente abrió el pozo por 1/8" de pulgada registrando una presión de 2000 (lb/pg²) y un gasto de 3500 BPD la temperatura de flujo en superficie es de 100 ° C.

Determinar el acortamiento o elongación del aparejo por el efecto de temperatura cuando el pozo fluyo por 1/16" y posteriormente por 1/8".



Solución

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots(1)$$

donde:

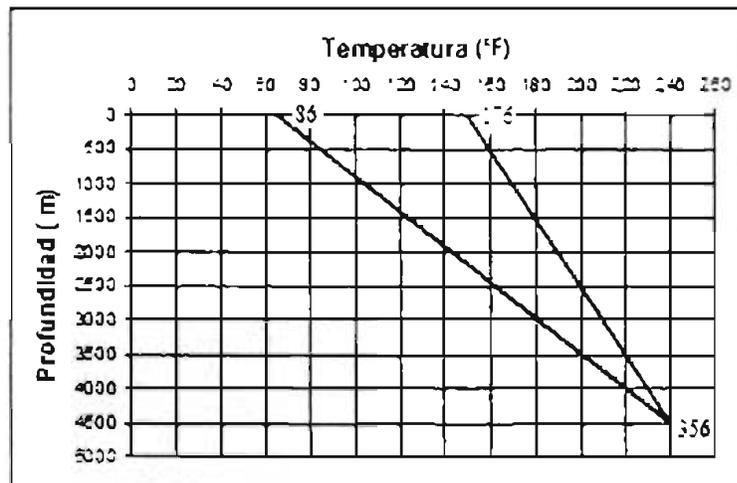
β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (^{\circ}\text{F}^{-1})$

L: Longitud de la T. P. (metros)

T_{s2} : Temperatura superficial después de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

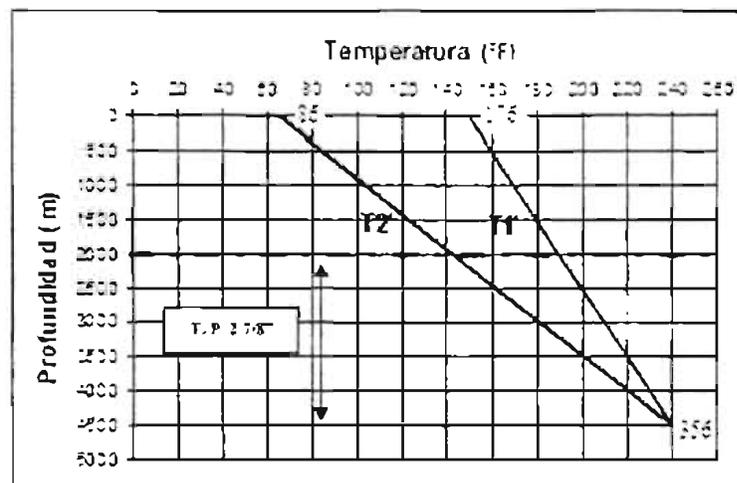
T_{s1} : Temperatura superficial antes de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

Suponiendo una temperatura en superficie de 30°C (86°F), una temperatura de flujo en superficie de 30°C (176°F) y la temperatura de la formación a disparar (356°F) el perfil de temperaturas es el siguiente:



El perfil de temperaturas puede ser expresado como la ecuación de una recta de la forma $y = mx + b$, la cual nos representará la temperatura a cualquier profundidad.

Tubería de 2 7/8 "



Calculando la temperatura superficial inicial:

$$T1' = \left(\frac{T_f - T_{s1}}{L} \right) * x + T_s \quad \dots(2)$$

Sustituyendo en (2):

$$T1' = \left(\frac{356 - 86}{5350} \right) * 3000 + 86 = 237.4^\circ F$$

Calculando la temperatura superficial final:

$$T2' = \left(\frac{T_f - T_{s2}}{L} \right) * x + T_s \quad \dots(3)$$

Sustituyendo en (3):

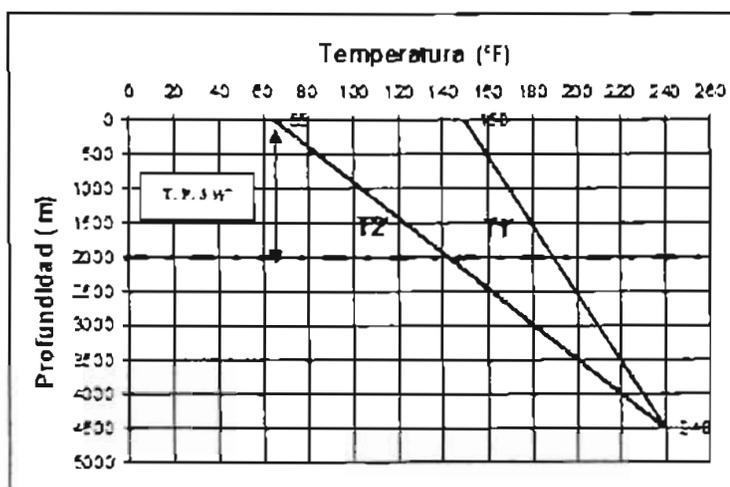
$$T2' = \left(\frac{356 - 176}{5350} \right) * 3000 + 176 = 277^\circ F$$

Sustituyendo en (1) para la tubería de 2 7/8" :

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 2300)}{2} (277 - 237.4) = 0.314(m)$$

El efecto de temperatura provoca un alargamiento de la tubería de 2 7/8" de 0.314 metros.

Tubería de 3 1/2"



Sustituyendo en (1) para la tubería de 3 1/2" :

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 3000)}{2} [(277 - 237.2) + (176 - 86)] = 1.3434(m)$$

El efecto de temperatura provoca un alargamiento de la tubería de 3 1/2" de 1.3434 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo debido al efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{2 3/8}} + \Delta L_{\text{3 1/2}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = 0.31 + 1.3434 = 1.6574 [m]$$

El cambio de longitud total del aparejo debido al efecto de temperatura es un alargamiento de 1.6574 metros.

Ejercicio N° 10⁴

Continuando con el ejercicio N° 9 determinar la fuerza a la que está sometido el aparejo producto del cambio de temperatura.

Solución

Calculando la fuerza por el cambio de temperatura a partir de la ley de Hooke:

$$\Delta L = - \frac{LF}{EA_t} \quad \dots(1)$$

Despejando la fuerza de la ecuación (1):

$$\Delta F = - \frac{EA_t}{L} \Delta L \quad \dots(2)$$

donde:

ΔF : Fuerza incremental resultante del cambio de temperatura (lb)

L: Longitud de la T. P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

ΔL : Cambio de longitud de la T. P. (m)

A_t : Área transversal de la tubería (pg²)

Calculando el área transversal para la tubería de 3 1/2":

$$A_t = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.9^2) = 3.0159$$

Sustituyendo en (2) para la tubería de 3 1/2":

$$\Delta F = - \frac{3 \times 10^7 * 3.0159}{3000} * (1.3434) = -40.515.6(lb)$$

Calculando el área transversal para la tubería de 2 7/8":

3. Ejercicios propuestos

Ejercicio N° 1

Determinar el acortamiento o elongación de la tubería de producción por efecto de temperatura de una tubería 3 1/2" P-110 12.7 (lb/pie) ($d=2.750''$), considerando que el espacio anular se encuentra lleno de agua y se represionó de cero a 4000 (lb/pg²), con una unidad de presión. Además se puso a producir aceite de 0.85 (gr/cm³), anteriormente estaba lleno de agua dulce. la temperatura del intervalo productor es de 120 ° C y la superficial de 30 ° C. Considerar un empacador permanente de 7 5/8" ($d=4''$), anclado a 3100 metros. La densidad del lodo de perforación de la última etapa fue de 1.6 (gr/cm³), la densidad del fluido en el espacio anular es de 1 (gr/cm³).

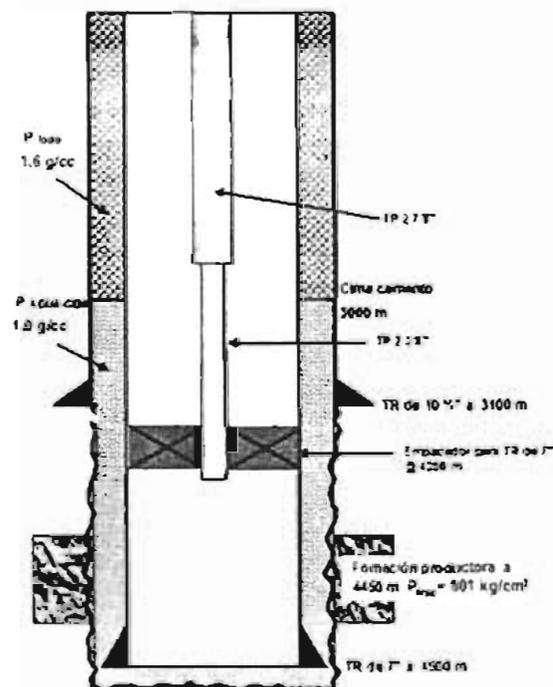
Ejercicio N° 2

Continuando con el ejercicio N° 1 determinar el acortamiento o elongación de la tubería por efecto de temperatura cuando el pozo se cerró y levanto una presión de 200 (lb/pg²), la temperatura que se registró en la cabeza del pozo fue de 70 ° C.

Ejercicio N° 3

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" N-80 de 26(lb/pie) de 0 a 1000 m, de 1000 m a 3000 m una 7" N-80 de 23(lb/pie) y de 3000 a 4500 m una 7" N-80 de 26(lb/pie). La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000m, la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x7"10M para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T.R. intermedia de 10 3/4" N-80 de 51(lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm³), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm³). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m. La presión de fractura de la formación a 4450 m es de 801 (kg/cm²).

Determinar el acortamiento o elongación del aparejo por efecto de temperatura, cuando se está realizando una de admisión realizada con agua dulce, alcanzando al presión de fractura de la formación considerando un aparejo de producción combinado de 2 7/8" TRC-95 8.6 (lb/pie) de 0 a 2200 metros y una T. P. de 2 3/8" P-110 4.6 (lb/pie) de 2200 a 4380, con empacador ($d=1.9''$) anclado a 4380 metros.



$$A_s = \frac{\pi}{4} (2.875^2 - 2.441^2) = 1.812$$

Sustituyendo en (2) para la tubería de 2 7/8":

$$\Delta F = -\frac{3 \times 10^7 * 1.812}{2300} * (0.314) = -7.421.32(lb)$$

Calculando la fuerza total a la que esta sometido el aparejo producto del cambio de temperatura:

$$\Delta F_{Total} = \Delta F_{31/2"} + \Delta F_{2 7/8"}$$

Sustituyendo:

$$\Delta F_{Total} = -40515.6 - 7421.32 = -47.936.92(lb)$$

La fuerza producto del cambio de temperatura es de 47,936.92 lb. de tensión, sin embargo hay que destacar que solo se manifiesta si la tubería esta agarrada en ambos extremos; en el caso contrario se manifiesta como elongación o contracción

Ejercicio N° 4

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar el acortamiento o elongación por el efecto de temperatura durante el vaciado del pozo.

Ejercicio N° 5

Continuando con el ejercicio N° 3 determinar el acortamiento y la elongación resultante por el efecto de temperatura con el pozo disparado, cerrado y lleno con aceite.

CAPÍTULO

IV

Diseño de Aparejos de Producción

Capítulo IV. Diseño de aparejos de producción

1. Aparejos con libre movimiento

El cálculo del máximo movimiento del aparejo en contracción y elongación nos permitirá definir la longitud de los sellos y el número de extensiones pulidas necesarias para absorber las contracciones y elongaciones de la tubería y así mantener siempre aislado el espacio anular del interior de la tubería de producción o, en su caso, determinar los esfuerzos en la tubería de producción y el empacador.

El máximo movimiento del aparejo ocurre cuando el aparejo se encuentra vacío, cuando se encuentra con agua dulce y se represiona hasta alcanzar la presión de fractura y cuando se pone a producir y luego se cierra. En cada uno de estos casos se tendrá que calcular el acortamiento o elongación por pistoneo, buckling, balanceo y temperatura.

Ejercicio N° 1 *

Considere un aparejo de producción de 4 1/2" N-80 13.5 # 1. D. 3.92" con empacador 415-01 80-32 para T. R. de 7 5/8" 39 # y el Baker anclado a 4300 m. Según yacimientos se espera un gasto de 5000 BPD y la temperatura de flujo en superficie se calcula en 110 ° C. Determinar la longitud de sellos del empacador.

Datos:

- Gradiente de fractura 0.80(lb/pg²)/pie, gradiente de formación 0.60 (lb/pg²)/pie
- Temperatura de fondo 160 ° C, temperatura en superficie 28 ° C
- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido por el espacio anular 1 gr/ cm³

Solución

- ✓ **Calculando el acortamiento o elongación para el aparejo vacío.**

Cuando el aparejo se encuentra vacío la presión interna es igual a cero por lo que la presión externa es mayor ($P_o > P_i$) y no existe efecto de buckling.

No se considera el efecto de temperatura debido a que no hay fluidos dentro del pozo.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s} \quad \dots(1)$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Tal que:

D: Diámetro externo de la T.P. (pg)

d: Diámetro interno de la T.P. (pg)

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4}(4.5^2 - 3.92^2) = 3.83$$

F_r : Fuerza resultante (lb)

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

Calculando:

$$A_p = \frac{\pi}{4}(d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4}(3.2)^2 = 8.042(\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4}(D)^2 = \frac{\pi}{4}(4.5)^2 = 15.9(\text{pg}^2)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4}(d)^2 = \frac{\pi}{4}(3.92)^2 = 12.06(\text{pg}^2)$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300[\text{m}]}{10} * 14.22 = 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 0(8.042 - 12.06) - 6114.6(8.04 - 15.9) = 48,060.756 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{EA_s} = - \frac{(4300) * (48,060.756)}{(3 \times 10^7) * 3.83} = -1.798$$

$$\Delta L = -1.798(\text{m})$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.798 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = - \frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(3)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (pg)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta\rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (lb/pg³)

R: Relación de diámetros

$$R = \frac{D}{d} = \frac{4.5(\text{pg})}{3.92(\text{pg})} = 1.1479$$

$\Delta\rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (lb/pg³)

ξ : Caída de presión en la tubería debido al flujo (lb/pg²)/pie

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1$ [gr/ cm ³]	$\rho_{i2} = 0$ [gr/ cm ³]	$\Delta \rho_i = -1$ $= -0.03612(\text{lb/pg}^3)$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1$ [gr/ cm ³]	$\rho_{o2} = 1$ [gr/ cm ³]	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0$ [lb/pg ²]	$P_{i2} = 0$ [lb/pg ²]	$\Delta P_i = 0$ [lb/pg ²]
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0$ [lb/pg ²]	$P_{o2} = 0$ [lb/pg ²]	$\Delta P_o = 0$ [lb/pg ²]

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{-\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right) \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L = -\frac{(0.3)(169248^2)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{-(0.03612)}{(1.1479)^2 - 1} \right) = 32.57(\text{pg}) \approx 2.71(\text{pies}) \approx 0.8273(\text{metros})$$

El efecto de baloneo provoca un alargamiento del aparejo de 0.8273 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo vacío es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = 0 - 1.798 + 0.8273 + 0 = -0.9707 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un acortamiento de 0.9707 metros.

✓ **Calculando el acortamiento o elongación para el *aparejo con agua dulce y represionado*.**

No se considera el efecto de temperatura debido a que no hay cambio de fluidos dentro del pozo.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4300_metros} + P_{inyección} \quad \dots(4)$$

Donde la presión a 4300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4300_metros} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(5)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{inyección}$):

$$P_{inyección} = P_{fractura} - P_{fluido} \quad \dots(6)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_F = G_{fractura} * h = 0.8 \left[\frac{\text{lb} / \text{pg}^2}{\text{pie}} \right] * 4600 [m] * 3.28 \left[\frac{\text{pie}}{m} \right] = 12,070.4 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(7)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4600 [m]}{10} * 14.22 = 6,541.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(8)$$

Sustituyendo (7) y (8) en (6):

$$P_{inyección} = 12070.4 - 6541.2 = 5,529.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(6')$$

Sustituyendo (5) y (6') en (4):

$$P_i = 6114.6 + 5529.2 = 11,643.8 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de Buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots(9)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(10)$$

Sustituyendo en (10):

$$F = 8.04 (\text{pg}^2) * \left(11643.8 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 44,454.76 [\text{lb}] \dots(10')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_o - w_o \dots(11)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 13.5 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(12)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_i A_i \dots(13)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (3.92^2) = 12.06 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (13):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 12.06 (\text{pg}^2) = 5.185 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(13')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \dots(14)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4}(D^2) = \frac{\pi}{4}(4.5^2) = 15.9(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (14):

$$w_o = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 15.9(\text{pg}^2) = 6.838 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(14')$$

Sustituyendo (12) (13') y (14') en (11):

$$w = 13.5 + 5.185 - 6.838 = 11.847 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (10') y (11') en (9):

$$n = \frac{44454.76[\text{lb}]}{11.847 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]} = 3,752.4[\text{ft}] = 1,143.7[\text{m}]$$

Cuando $n < L$ ($1,143.7 < 4,300$) como en este caso, se considera que parte de la tubería esta bucleada. y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \epsilon I w} \quad \dots(15)$$

Calculando el claro radial (pg^2):

$$r = \frac{D_{\text{IntR}} - d_{\text{ExtTP}}}{2} = \frac{6.625 - 4.5}{2} = 1.0625[\text{pg}]$$

Calculando el momento inercial:

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (4.5^4 - 3.92^4) = 8.538[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (15):

$$\Delta L = - \frac{(1.0625[\text{pg}])^2 * (44,454.76[\text{lb}])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) * (8.538[\text{pg}^4]) * \left(11.847 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \right)} = -0.0919[\text{pies}] \approx -0.028(\text{m})$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.028 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = - \frac{L F_r}{\epsilon A_s} \quad \dots(1)$$

Calculando la fuerza resultante (lb):

$$F_r = P_i(A_r - A_i) - P_o(A_r - A_o) \quad \dots(2)$$

La presión interna y la presión externa ya se calcularon anteriormente.

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 11643.8(8.042 - 12.06) - 6114.6(8.04 - 15.9) = 1275.9676 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(4300) * (1275.9676)}{(3 \times 10^7) * 3.83} = -0.04775$$

$$\Delta L = -0.04775(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 0.04775 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(3)$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = 0 \text{ (lb/pg}^3\text{)}$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 5,529.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 5,529.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right) \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(4300)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{5529.2}{(1.1479)^2 - 1} \right) = -1.496(m)$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.496 metros.

El cambio de longitud total del aparejo con agua dulce y represionado es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.028 - 0.04775 - 1.496 + 0 = -1.5717 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un acortamiento de 1.5717 metros.

- ✓ **Calculando el acortamiento o elongación para cuando el aparejo se pone a producir.**

Efecto de Temperatura

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots(16)$$

donde:

β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (^{\circ}\text{F}^{-1})$

L: Longitud de la T. P. (metros)

T_{s2} : Temperatura superficial después de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

T_{s1} : Temperatura superficial antes de la prueba ($^{\circ}\text{F}$)

Sustituyendo en (16):

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 4300)}{2} (230 - 82.4) = 2.1896 \text{ (metros)}$$

El efecto de temperatura provoca un alargamiento de la tubería de 2.1896 metros.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4300_metros} + P_{\text{superficie}} \dots(17)$$

Donde la presión a 4300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 0.79 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4300_metros} = \frac{0.79 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 4,830.534 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(18)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{superficie}$):

$$P_{superficie} = P_{formación} - P_{fluido} \quad \dots(19)$$

Donde la presión de formación es igual al gradiente de formación por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_f = G_{formación} * h = 0.6 \left[\frac{lb/pg^2}{pie} \right] * 4600[m] * 3.28 \left[\frac{pie}{m} \right] = 9,052.8 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(20)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{fluido} = 0.79 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{0.79 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4600[m]}{10} * 14.22 = 5,167.548 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(21)$$

Sustituyendo (20) y (21) en (19):

$$P_{superficie} = 9052.8 - 5167.548 = 3,885.25 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(19')$$

Sustituyendo (18) y (19') en (17):

$$P_i = 4830.534 + 3885.25 = 8,715.784 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de Buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \quad \dots(9)$$

Calculando la fuerza ficticia (lb):

$$F = A_p (P_i - P_o) \quad \dots(10)$$

Sustituyendo en (10):

$$F = 8.04(\rho g^2) * \left(8715.784 \left[\frac{lb}{\rho g^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{lb}{\rho g^2} \right] \right) = 20,913.519[lb] \quad \dots(10.1)$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_r - w_o \quad \dots(11)$$

Sustituyendo en (11):

$$w = 13.5 + 5.185 - 6.838 = 11.847 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (10.1) y (11') en (9):

$$n = \frac{20913.519[lb]}{11.847 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 1,765.3[ft] = 538.06[m]$$

Cuando $n < L$ ($538.06 < 4,300$) como en este caso, se considera que parte de la tubería esta bucleada, y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = -\frac{r^2 F^2}{8 \epsilon I w} \quad \dots(15)$$

Sustituyendo en (15):

$$\Delta L = -\frac{(1.0625[\rho g])^2 * (20,913.519[lb])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{lb}{\rho g^2} \right] \right) * (8.538[\rho g^4]) * \left(11.847 \left[\frac{lb}{pie} \right] \right)} = -0.0203[pies] \approx -0.00618(m)$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.00618 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{L F_r}{\epsilon A_c} \quad \dots(1)$$

Calculando la fuerza resultante (lb):

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

La presión interna y la presión externa ya se calcularon anteriormente.

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 8715.784(8.042 - 12.06) - 6114.6(8.04 - 15.9) = 13040.7356 (lb)$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(4300) \cdot (13040.7356)}{(3 \times 10^7) \cdot 3.83} = -0.488$$

$$\Delta L = -0.488(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 0.488 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(3)$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1$ [gr/cm ³]	$\rho_{i2} = 0.79$ [gr/cm ³]	$\Delta \rho_i = -0.21$ $= -0.00758$ (lb/pg ³)
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1$ [gr/cm ³]	$\rho_{o2} = 1$ [gr/cm ³]	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 2,511.6$ [lb/pg ²]	$P_{i2} = 3,885.2$ [lb/pg ²]	$\Delta P_i = 1,373.6$ [lb/pg ²]
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0$ [lb/pg ²]	$P_{o2} = 0$ [lb/pg ²]	$\Delta P_o = 0$ [lb/pg ²]

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L_3 = -\frac{0.3(169248^2)}{3 \times 10^7} \left(\frac{-0.007585}{1.1479^2 - 1} \right) - \frac{2(0.3)(169248)}{3 \times 10^7} \left(\frac{1373.6}{1.1479^2 - 1} \right) = -7.7974 \text{ (pg)}$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 0.1980 metros.

El cambio de longitud total del aparejo cuando se pone a producir y luego se cierra es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.00618 - 0.488 - 0.1980 + 2.1896 = 1.4974 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un alargamiento de 1.4968 metros.

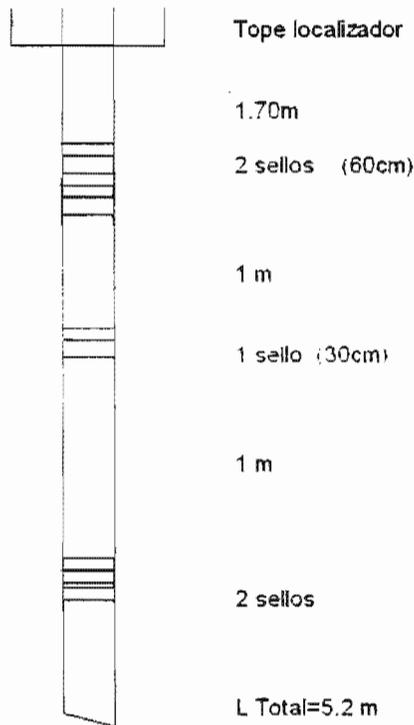
De acuerdo a los resultados obtenidos:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{(vacío)}} &= -0.9707 \\ \Delta L_{\text{(repressionado)}} &= -1.5717 \\ \Delta L_{\text{(produciendo)}} &= 1.4974 \end{aligned}$$

Calculando la longitud del sello:

$$1.4974 + 1.5717 + 1 = 4.06$$

La distribución del sistema empacador y unidades de sello son un tope localizador a 1.70 m del empacador, 2 unidades de sello, tubo espaciador de 1.0 m, 1 unidad de sello, tubo espaciador de 1.0 m, mas 2 unidades de sellos. Con esta distribución se garantiza que el interior de la tubería de producción, siempre estará aislado del espacio anular.



Ejercicio N° 2⁴

Considere un aparejo de producción de 4 1/2" N-80 13.5 (lb/pie) (d= 3.92") con empacador 415-01 80-44 para T. R. de 7 5/8" 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4300 m. Según yacimientos se espera un gasto de 5000 BPD y la temperatura de flujo en superficie se calcula en 110 ° C.

Determinar la longitud de sellos del empacador.

Datos:

- Gradiente de fractura 0.80(lb/pg²)/pie, gradiente de formación 0.60 (lb/pg²)/pie
- Temperatura de fondo 160 ° C , temperatura en superficie 28 ° C
- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido por el espacio anular salmuera de 1.3 gr/cm³

Solución

- ✓ Calculando el acortamiento o elongación para el *aparejo vacío*.

Cuando el aparejo se encuentra vacío la presión interna es igual a cero por lo que la presión externa es mayor ($P_o > P_i$) y no existe efecto de buckling.

No se considera el efecto de temperatura debido a que no hay fluidos dentro del pozo.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s} \quad \dots(1)$$

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4}(4.5^2 - 3.92^2) = 3.83$$

Calculando la fuerza resultante (lb):

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4}(d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4}(4.4)^2 = 15.2(\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4}(D)^2 = \frac{\pi}{4}(4.5)^2 = 15.9(\text{pg}^2)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4}(d)^2 = \frac{\pi}{4}(3.92)^2 = 12.06(\text{pg}^2)$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1.3 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1.3 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300 [m]}{10} * 14.22 = 7.948.98 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 0(8.042 - 12.06) - 7948.98(15.20 - 15.9) = 5564.286 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(4300) * (5564.286)}{(3 \times 10^7) * 3.83} = -0.2078$$

$$\Delta L = -0.2078(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 0.2078 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(3)$$

Calculando la relación de diámetros:

$$R = \frac{D}{d} = \frac{4.5(pg)}{3.92(pg)} = 1.1479$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr. cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 0 \text{ [gr. cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = -1$ $= -0.03612 \text{ (lb/pg}^3\text{)}$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1.3 \text{ [gr. cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 1.3 \text{ [gr. cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{-\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right) \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L = -\frac{(0.3)(169248^2)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{-(0.03612)}{(1.1479)^2 - 1} \right) = 32.57(\text{pg}) \approx 2.71(\text{pies}) \approx 0.8273(\text{metros})$$

El efecto de baloneo provoca un alargamiento del aparejo de 0.8273 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo vacío es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = 0 - 0.2078 + 0.8273 + 0 = 0.6195 (\text{metros})$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un alargamiento de 0.619 metros.

✓ **Calculando el acortamiento o elongación para el aparejo con agua dulce y represionado.**

No se considera el efecto de temperatura debido a que no hay cambio de fluidos dentro del pozo.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4300_metros} + P_{inyección} \dots(4)$$

Donde la presión a 4300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4300_metros} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots(5)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{inyección}$):

$$P_{inyección} = P_{fractura} - P_{fluido} \dots(6)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_f = G_{fractura} * h = 0.8 \left[\frac{\text{lb / pg}^2}{\text{pie}} \right] * 4600[m] * 3.28 \left[\frac{\text{pie}}{m} \right] = 12,070.4 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots(7)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{\text{fluido}} = \frac{1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4600 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 6,541.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots(8)$$

Sustituyendo (7) y (8) en (6):

$$P_{\text{inyección}} = 12070.4 - 6541.2 = 5,529.2 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots(6')$$

Sustituyendo (5) y (6') en (4):

$$P_i = 6114.6 + 5529.2 = 11,643.8 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1.3 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_o = \frac{1.3 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 7,948.98 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de Buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots(9)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(10)$$

Sustituyendo en (10):

$$F = 15.2 (\text{pg}^2) * \left(11643.8 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 7948.98 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 56,161.264 [\text{lb}] \dots(10')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_i - w_o \dots(11)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 13.5 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \dots(12)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_i A_i \dots(13)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (3.92^2) = 12.06(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (13):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 12.06(\text{pg}^2) = 5.185 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(13')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \quad \dots(14)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D^2) = \frac{\pi}{4} (4.5^2) = 15.9(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (14):

$$w_o = 0.43 * 1.3 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 15.9(\text{pg}^2) = 8.88 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(14')$$

Sustituyendo (12) (13') y (14') en (11):

$$w = 13.5 + 5.185 - 8.88 = 9.805 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (10') y (11') en (9):

$$n = \frac{56161.264[\text{lb}]}{9.805 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]} = 5,727.81[\text{ft}] = 1,745.83[\text{m}]$$

Cuando $n < L$ ($1,745.83 < 4,300$) como en este caso, se considera que parte de la tubería esta nucleada. y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8EIw} \quad \dots(15)$$

Calculando el claro radial (pg^2):

$$r = \frac{D_{\text{IntTR}} - d_{\text{ExtTP}}}{2} = \frac{6.625 - 4.5}{2} = 1.0625[\text{pg}]$$

Calculando el momento inercial :

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (4.5^4 - 3.92^4) = 8.538[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (15):

$$\Delta L = - \frac{(1.0625[\text{pg}])^2 * (56161.264[\text{lb}])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] * (8.538[\text{pg}^4]) * \left(9.805 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \right) \right)} = -0.1772[\text{pies}] \approx -0.054(\text{m})$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.054 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\varepsilon A_s} \dots(1)$$

Calculando la fuerza resultante (lb):

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \dots(2)$$

La presión interna y la presión externa ya se calcularon anteriormente.

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 11643.8(15.2 - 12.06) - 7948.98(15.2 - 15.9) = 42,125.818 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(4300) * (42125.818)}{(3 \times 10^7) * 3.83} = -1.5765$$

$$\Delta L = -1.5765(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.5765 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1 + 2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(3)$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = 0 \text{ (lb/pg}^3\text{)}$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 5,529.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 5,529.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right) \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(4300)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{(5529.2)}{(1.1479)^2 - 1} \right) = -1.496(m)$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.496 metros.

El cambio de longitud total del aparejo con agua dulce y represionado es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.054 - 1.5765 - 1.496 + 0 = -3.1265 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un acortamiento de 3.1265 metros.

- ✓ **Calculando el acortamiento o elongación para cuando el aparejo se pone a producir.**

Efecto de Temperatura

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \dots(16)$$

Sustituyendo en (16):

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 4300)}{2} (230 - 82.4) = 2.1896 \text{ (metros)}$$

El efecto de temperatura provoca un alargamiento de la tubería de 2.1896 metros.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4300 \text{ metros}} + P_{\text{superficie}} \dots(17)$$

Donde la presión a 4300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{\text{fluido}} = 0.79 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4300_metros} = \frac{0.79 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 4,830.534 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(18)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{superficie}$):

$$P_{superficie} = P_{formación} - P_{fluido} \quad \dots(19)$$

Donde la presión de formación es igual al gradiente de formación por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_F = G_{formación} * h = 0.6 \left[\frac{lb / pg^2}{pie} \right] * 4600[m] * 3.28 \left[\frac{pie}{m} \right] = 9,052.8 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(20)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{fluido} = 0.79 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{0.79 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4600[m]}{10} * 14.22 = 5,167.548 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(21)$$

Sustituyendo (20) y (21) en (19):

$$P_{superficie} = 9052.8 - 5167.548 = 3,885.25 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(19')$$

Sustituyendo (18) y (19') en (17):

$$P_i = 4830.534 + 3885.25 = 8,715.784 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{fluido} = 1.3 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empaquetador.

$$P_o = \frac{1.3 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 7,948.98 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de Buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \quad \dots(9)$$

Calculando la fuerza ficticia (lb):

$$F = A_p (P_i - P_o) \quad \dots(10)$$

Sustituyendo en (10):

$$F = 15.2(pg^2) * \left(8715.784 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] - 7948.98 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) = 11,655.42 [lb] \quad \dots(10.1)$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_t - w_o \quad \dots(11)$$

Sustituyendo en (11):

$$w = 13.5 + 5.185 - 8.88 = 9.805 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (10.1) y (11') en (9):

$$n = \frac{11655.42 [lb]}{9.805 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 1.188.72 [ft] = 362.32 [m]$$

Cuando $n < L$ ($362.32 < 4.300$) como en este caso, se considera que parte de la tubería esta bucleada, y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \varepsilon I w} \quad \dots(15)$$

Sustituyendo en (15):

$$\Delta L = - \frac{(1.0625 [pg])^2 * (11655.42 [lb])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) * (8.538 [pg^4]) * \left(11.847 \left[\frac{lb}{pie} \right] \right)} = -0.00631 [pies] \approx -0.00192 (m)$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.00192 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = - \frac{L F_r}{\varepsilon A_s} \quad \dots(1)$$

Calculando la fuerza resultante (lb):

$$F_r = P_i (A_p - A_i) - P_o (A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

La presión interna y la presión externa ya se calcularon anteriormente.

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 8715.784(15.2 - 12.06) - 7948.98(15.2 - 15.9) = 32,931.84 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{E A_s} = -\frac{(4300) * (32931.84)}{(3 \times 10^7) * 3.83} = -1.2324$$

$$\Delta L = -1.2324(m)$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 1.2324 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(3)$$

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 0.79 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = -0.21$ $= -0.00758(\text{lb/pg}^3)$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 2,511.6 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 3,885.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 1,373.6 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right) \dots(3')$$

Sustituyendo en (3'):

$$\Delta L_s = -\frac{0.3(169248^2)}{3 \times 10^7} \left(\frac{-0.00758}{1.1479^2 - 1} \right) - \frac{2(0.3)(169248)}{3 \times 10^7} \left(\frac{1373.65}{1.1479^2 - 1} \right) = -7.8199(\text{pg})$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 0.1986 metros.

El cambio de longitud total del aparejo cuando se pone a producir y luego se cierra es:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.00192 - 1.2324 - 0.1986 + 2.1896 = 1.4968 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los efectos es un alargamiento de 1.4968 metros.

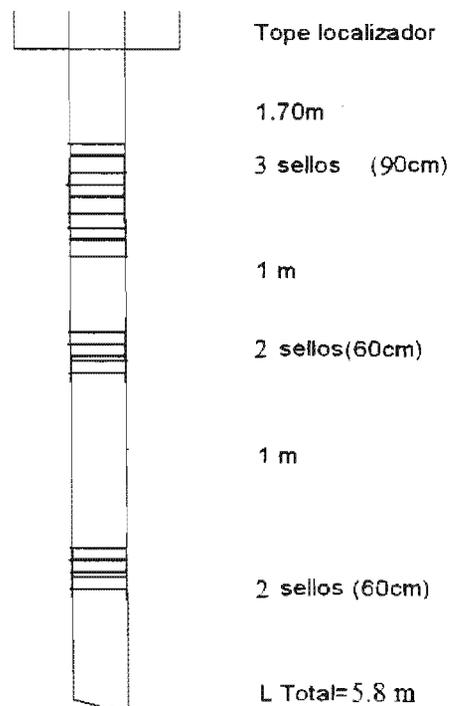
De acuerdo a los resultados obtenidos:

$$\begin{aligned} \Delta L_{(\text{vacío})} &= 0.6195 \\ \Delta L_{(\text{represionado})} &= -3.1265 \\ \Delta L_{(\text{produciendo})} &= 1.4968 \end{aligned}$$

Calculando la longitud del sello:

$$3.1265 + 1.4968 + 1 = 5.62$$

La distribución del sistema empacador y unidades de sello son un tope localizador a 1.70 m del empacador, 3 unidades de sello, tubo espaciador de 1.0 m, 2 unidades de sello, tubo espaciador de 1.0 m, mas 2 unidades de sello. Con esta distribución se garantiza que el interior de la tubería de producción, siempre estará aislado del espacio anular.



2. Aparejos con movimiento limitado

En algunas ocasiones ya sea por diseño o por problemas mecánicos, al aparejo de producción no se le permite el libre movimiento.

En estos casos los incrementos y/o decrementos de longitud debidos a los efectos de pistoneo, baloneo, buckling y temperatura, producen esfuerzos, tanto en la tubería como en el empacador.

Estas fuerzas pueden ser capaces de sobrepasar el punto de cedencia de la tubería y ocasionar una falla o ruptura del tubo.

Para calcular la fuerza a las que estará sujeta la tubería en aparejos con movimiento limitado, se deberá calcular el acortamiento o elongación total del sistema como si se le permitiera el libre movimiento (ΔL). Este ΔL es el resultado del cambio de longitud producto de la ley de Hooke así como del efecto de buckling.

Cuando el efecto de buckling no esta presente, solo se considera la ley de Hooke:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s}$$

De esta ecuación vamos a despejar la fuerza resultante, producto del efecto de baloneo, pistoneo y temperatura, quedando:

$$F = -\frac{\epsilon A_s \Delta L_{total}}{L}$$

Cuando el efecto de buckling esta presente y el punto neutro es menor que la longitud total de la tubería, el cambio de longitud es:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s} - \frac{r^2 F^2}{8\epsilon I w}$$

De esta ecuación vamos a despejar la fuerza resultante, producto del efecto de baloneo, pistoneo, temperatura y buckling, quedando:

$$F = \frac{\frac{L}{\epsilon A_s} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{\epsilon A_s}\right)^2 - \frac{r^2 \Delta L}{2\epsilon I w}}}{\frac{r^2}{4\epsilon I w}}$$

donde:

- L: Longitud de la T.P. (pg)
- ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)
- r: Radio de la T.P. (pg)
- w: Peso de la tubería (lb/pg)
- ΔL : Cambio de longitud total (pg)
- I: Momento inercial (pg⁴)

Ejercicio N° 3⁴

Considerar un aparato de producción de 2 7/8 " N-80 6.4 (lb/pie) (d= 2.441") con empacador R3 I. D. 2.441" para TR de 7 " 39 (lb/pie) y el Baker anclado a 4300 m.
Determinar la fuerza resultante durante el vaciado del pozo

Datos:

- Gradiente de fractura 0.8 (lb/pg²)/ft
- Gradiente de formación 0.6 (lb/pg²)/ft
- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 gr/cm³
- Densidad del fluido en el espacio anular 1 gr/cm³
- Temperatura de fondo 160 ° C, temperatura en superficie 28 ° C

Solución

Durante el vaciado del pozo, la presión interna es igual a cero por lo que la presión externa es mayor ($P_o > P_i$) y no existe efecto de buckling, tampoco se considera el efecto de temperatura, por que, no hay cambio de fluidos en el pozo.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\epsilon A_s} \quad \dots(1)$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (2.875^2 - 2.441^2) = 1.81$$

F_r : Fuerza resultante (lb)

$$F_r = P_i (A_p - A_i) - P_o (A_p - A_o) \quad \dots(2)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{empacador}})^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.67 (\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (2.875)^2 = 6.49 (\text{pg}^2)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.68 (\text{pg}^2)$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_u = \frac{\left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4300 [\text{m}]}{10} * 14.22 = 6114.6 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (2):

$$F_r = 0(4.67 - 4.68) - 6114.6(4.67 - 6.49) = 11128.57 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = -\frac{(4300) * 3.28 * (11,128.57)}{(3 \times 10^7) * 1.81} = -2.89 \text{ (pies)}$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 2.89 pies.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(3)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (pg)

ε : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta \rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (lb/pg³)

R: Relación de diámetros

$$R = \frac{D}{d} = \frac{2.875(\text{pg})}{2.441(\text{pg})} = 1.1777$$

$\Delta \rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (lb/pg³)

ξ : Caída de presión en la tubería debido al flujo (lb/pg²)·pie

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = -1$ $= -0.03612(\text{lb/pg}^3)$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{\epsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\epsilon} \left(\frac{-\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right)$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{(0.3)(169248^2)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{-(0.03612)}{(1.777)^2 - 1} \right) = 26.85(\text{pg}) \approx 2.237(\text{pies}) \approx 0.682(\text{metros})$$

El efecto de baloneo provoca un alargamiento del aparejo de 2.237 pies.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo durante el vaciado del pozo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = 0 - 2.89 + 2.237 = -0.653[\text{pies}] \approx -0.199(\text{metros})$$

El cambio de longitud total debida a los tres efectos es un acortamiento de 0.199 metros.

Calculando la fuerza resultante durante el vaciado del pozo.

$$F = -\frac{\epsilon A_s \Delta L_{\text{total}}}{L}$$

Sustituyendo:

$$F = -\frac{(3 \times 10^7)(1.81)(-0.199)}{4300} = 2,512.95(\text{lb})$$

La fuerza resultante durante el vaciado del pozo es de 2,512.95 (lb).

Ejercicio N° 4⁴

Determinar si el aparejo resiste el vaciado del pozo

Solución

Para determinar si la tubería resiste, se necesita calcular el esfuerzo triaxial a la altura del cabezal (Punto A) y a la altura del empacador (Punto B).

Calculando el esfuerzo axial a la altura del cabezal (A):

$$\sigma_{\text{ax}} = \frac{W_{TR}}{A_s} \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots(1)$$

donde:

W_{TP} : Peso de la TP (lb)

$$W_{TP} = F - W_{TP278}$$

F: Fuerza resultante (lb)

A_s : Área transversal (pg)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \text{ (pg)}$$

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (2.875^2 - 2.441^2) = 1.81$$

Sustituyendo en (1):

$$\sigma_{ZA} = \frac{2512.95 - (6.4 * 4300 * 3.28)}{1.81} = -48,482.12 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la altura del cabezal (σ_T):

$$\sigma_T = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2} \dots (2)$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (P_o - P_i)$$

P_o : Presión externa en el punto A (lb/pg²)

P_i : Presión interna en el punto A (lb/pg²)

La presión interna y la presión externa en el cabezal durante el vaciado del pozo son igual a cero.

Sustituyendo:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0 - 0) = 0 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right)^2}{\left(\frac{D}{t} \right) - 1} \right]$$

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{2.876 - 2.441}{2} = 0.217 \text{ (pg)}$$

Sustituyendo:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{2.876}{0.217} \right)^2}{\left(\frac{2.876}{0.217} \right) - 1} \right] = 7.165 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

$$f_3 = \sigma_z - \left[\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right]$$

r_i : Radio interno (1.22 pg)

r_o : Radio externo (1.4375 pg)

P_i : Presión interna (lb/pg²)

P_o : Presión externa (lb/pg²)

$$f_3 = 48482.12 - \left[\frac{(1.22)^2 * 0 - (1.4375)^2 (0)}{(1.4375)^2 - (1.22)^2} \right] = 48482.12 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo f_1 , f_2 y f_3 en (2):

$$\sigma_{TA} = \sqrt{(48482.12)^2} = 48482.12 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Como el esfuerzo triaxial en el punto A es menor que el punto de cedencia de la tubería, ésta si resiste el vaciado del pozo en el cabezal.

Calculando el esfuerzo axial a la altura del empacador (B):

Sustituyendo en (1):

$$\sigma_{zB} = \frac{2512.95}{1.81} = 1,388.37 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la altura del empacador (σ_B):

$$\sigma_T = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2} \dots (2)$$

La presión externa se calculo en el ejercicio N° 3.

Sustituyendo:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (6114.6 - 0) = 5,295.39 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{2.876}{0.217} \right)^2}{\left(\frac{2.876}{0.217} \right) - 1} \right] = 7.165 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

$$f_3 = 1388.37 - \left[\frac{(1.22)^2 * 0 - (1.4375)^2 (6114.6)}{(1.4375)^2 - (1.22)^2} \right] = 23,248.42 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo f_1 , f_2 y f_3 en (2):

$$\sigma_{TB} = \sqrt{(5295.39 * 7.165)^2 + (23248.42)^2} = 44,497.68 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Como el esfuerzo triaxial en el punto B es menor que el punto de cedencia de la tubería, ésta si resiste el vaciado del pozo a la altura del empacador.

Considerando estos dos puntos la tubería de 2 7/8" N-80 si resiste el vaciado del pozo.

Ejercicio N° 5

Continuando con el ejercicio N° 3, calcular la fuerza resultante cuando se está represionando el pozo, el intervalo a fracturar esta a 4.600 metros.

Solución

Cuando se esta represionando el pozo no se considera el efecto de temperatura ya que no hay cambio de fluidos.

Calculando la presión interna a la altura del empacador:

$$P_i = P_{4300_metros} + P_{inyección} \quad \dots(1)$$

Donde la presión a 4300 metros es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido dentro de la tubería ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del empacador.

$$P_{4300_metros} = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(2)$$

Calculando la presión de inyección ($P_{inyección}$):

$$P_{inyección} = P_{fractura} - P_{fluido} \quad \dots(3)$$

Donde la presión de fractura es igual al gradiente de fractura por la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_f = G_{fractura} * h = 0.8 \left[\frac{lb / pg^2}{pie} \right] * 4600[m] * 3.28 \left[\frac{pie}{m} \right] = 12,070.4 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(4)$$

La presión de la columna de fluido es igual a la presión hidrostática que ejercerá el fluido en el espacio anular ($\rho_{fluido} = 1 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad del intervalo a fracturar.

$$P_{fluido} = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4600[m]}{10} * 14.22 = 6,541.2 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(5)$$

Sustituyendo (4) y (5) en (3):

$$P_{mexcción} = 12070.4 - 6541.2 = 5,529.2 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad \dots(3')$$

Sustituyendo (2) y (3') en (1):

$$P_i = 6114.6 + 5529.2 = 11,643.8 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión externa (P_o):

La presión externa es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular (ρ_{fluido}= 1 gr/cm³) a la profundidad del emparador.

$$P_o = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 4300[m]}{10} * 14.22 = 6.114.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \quad \dots(6)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \quad \dots(7)$$

Donde el área del emparador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{emparador})^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.679 (pg^2)$$

Sustituyendo en (7):

$$F = 4.679 (pg^2) * \left(11,643.8 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] - 6114.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) = 25,871.12 [lb] \quad \dots(7')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_o - w_u \quad \dots(8)$$

Donde el peso de la tubería por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 6.4 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \dots(9)$$

El peso del fluido del interior por unidad de longitud (w_i) es:

$$w_i = 0.43 \rho_i A_i \quad \dots(10)$$

Donde el área interna de la T. P. (A_i) es igual a:

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d^2) = \frac{\pi}{4} (2.44 \text{ l}^2) = 4.679 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (10):

$$w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 4.679 (\text{pg}^2) = 2.012 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(10')$$

El peso del fluido del espacio anular por unidad de longitud (w_o) es:

$$w_o = 0.43 \rho_o A_o \quad \dots(11)$$

Donde el área externa de la T. P. (A_o) es igual a:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (2.875^2) = 6.491 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (11):

$$w_o = 0.43 * 1 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 6.491 (\text{pg}^2) = 2.791 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(11')$$

Sustituyendo (9) (10') y (11') en (8):

$$w = 6.4 + 2.012 - 2.79 = 5.622 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \quad \dots(8')$$

Sustituyendo (7') y (8') en (6):

$$n = \frac{25871.12 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]}{5.622 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right]} = 4.601.76 \left[\text{ft} \right] = 1,402.61 \left[\text{m} \right]$$

Cuando $n < L$ ($1,402.61 < 4300$) como en este caso. se considera que parte de la tubería esta nucleada, y se utiliza la siguiente ecuación para determinar su variación de longitud:

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \epsilon w} \quad \dots(12)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

w: Peso de la tubería (lb/pie)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

r: Claro radial (pg²)

$$r = \frac{D_{IntTP} - d_{ExtTP}}{2} = \frac{5.86 - 2.875}{2} = 1.4925 \left[\text{pg} \right]$$

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64}\right)(D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64}\right)(2.875^4 - 2.441^4) = 1.6109[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (12):

$$\Delta L = - \frac{(1.4925[\text{pg}])^2 * (25871.12[\text{lb}])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}\right]\right) * (1.6109[\text{pg}^4]) * \left(5.622 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}}\right]\right)} = -0.6859[\text{pies}]$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.6859 pies ó 0.209 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{\epsilon A_s} \quad \dots(13)$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (metros)

ϵ : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

A_s : Área transversal de la tubería (pg²)

$$A_s = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$$

Tal que:

D: Diámetro externo de la T.P. (pg)

d: Diámetro interno de la T.P. (pg)

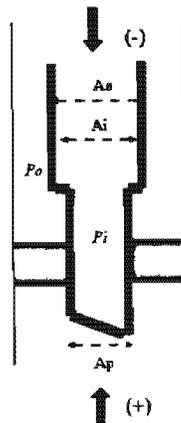
Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4}(2.875^2 - 2.441^2) = 1.81$$

F_r : Fuerza resultante (lb)

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(14)$$

donde:



$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{empacador})^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.67(\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (2.875)^2 = 6.49(\text{pg}^2)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.441)^2 = 4.68(\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (14):

$$F_r = 11,643.8(4.67 - 4.68) - 6114.6(4.67 - 6.49) = 11,012.134 \text{ (lb)}$$

Sustituyendo en (13):

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{EA_s} = \frac{(4300) * 3.28 * (11,012.134)}{(3 \times 10^7) * 1.81} = -2.8603$$

$$\Delta L = -2.8603(\text{pies})$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 2.8603 pies o 0.8718 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \dots(15)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (pg)

ε : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta \rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (lb/pg³)

R: Relación de diámetros

$$R = \frac{D}{d} = \frac{2.875(\text{pg})}{2.441(\text{pg})} = 1.1777$$

$\Delta \rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (gr/cm³)

ξ : Caída de presión en la tubería debido al flujo (lb/pg²)/pie

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i2} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = 0$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o1} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o2} = 0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i1} = 6,114.6 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i2} = 11,643.8 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 5,529.2 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

Por lo que la ecuación (15) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{\varepsilon} \left(\frac{-\Delta P_i}{R^2 - 1} \right)$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(169,248)}{3 \times 10^7} * \left(\frac{5529.2}{(1.177)^2 - 1} \right) = -48.571(\text{pg}) \approx -4.0476(\text{pies}) \approx -1.234(\text{metros})$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 4.0476 pies o 1.234 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo cuando se terminó de disparar el intervalo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.6859 - 2.8603 - 4.0476 = -7.5938 [\text{pies}] \approx -2.3145(\text{metros})$$

El cambio de longitud total debida a los tres efectos es un acortamiento de 7.5938 pies o 2.3145 metros.

Calculando la fuerza resultante cuando se está represionando el pozo.

$$F = \frac{\frac{L}{\varepsilon A s} \pm \left[\left(\frac{L}{\varepsilon A s} \right)^2 - \frac{r^2 \Delta L}{2 \varepsilon I W} \right]}{r^2}$$

$$\frac{4 \varepsilon I W}{r^2}$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (pg)

ε : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

r: Radio de la T.P. (pg)

w: Peso de la tubería (lb/pg)

ΔL : Cambio de longitud total (pg)

I: Momento inercial (pg⁴)

Sustituyendo:

$$F = \frac{\frac{169248}{3 \times 10^7 (1.81)} \pm \left(\frac{169248}{3 \times 10^7 (1.81)} \right)^2 - \frac{(1.49)^2 (-91.12)}{2(3 \times 10^7)(1.6109)(0.636)}}{(1.49)^2} = -26.539.1336(lb)$$

$$\frac{4(3 \times 10^7)(1.6109)(0.636)}{}$$

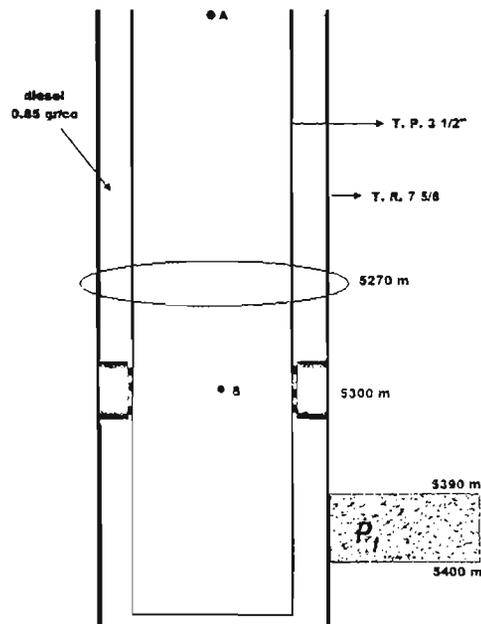
La fuerza resultante cuando se está represionando el pozo es de -26,539.1336 (lb).

Ejercicio N° 6⁴

Considerar un aparejo de producción de 3 1/2" N-80 9.2 # 1. D. 2.99" con empacador 413-01 con ancla. El empacador es para T. R. de 7 5/8" 39 #, el Baker se encuentra anclado a 5300 m; para absorber los movimientos de la tubería se colocó una junta de expansión con un I. D. de 4.0" de una longitud de 3m, ubicada tres tramos arriba del empacador y se ha colocado totalmente abierta, el pozo se encontraba lleno con agua dulce y el espacio anular lleno con diesel de 0.85 gr/cm³.

Después de disparar el intervalo 5390 - 5400 el pozo fluyo por 1/8" con 250 kg/cm² a una temperatura de flujo de 70 °C y densidad de 0.70 gr/cm³, procedió a cerrar el pozo y registró una presión de 300 kg/cm² en la cabeza.

Determinar la fuerza resultante sobre la tubería y determinar si la tubería resistirá el cierre.



Solución

Calculando la presión interna a la altura de la junta de expansión:

$$P_i = P_{superficie} + P_{hidrostatica} \quad \dots(1)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 300 kg/cm² (4266 lb/pg²) por que se está represionando la T. P., y la presión hidrostática es la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería de producción ($\rho_{\text{fluido}} = 0.70 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de la junta de expansión (considerar que un tramo equivale a 10 metros).

$$P_{\text{hidrostatica}} = \frac{0.70 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5270[m]}{10} * 14.22 = 5,245.7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 4266 + 5245.7 = 9.511.76 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión externa (P_o) a la altura de la junta de expansión es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 0.85 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de la junta de expansión.

$$P_o = \frac{0.85 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5270[m]}{10} * 14.22 = 6,369.85 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots(2)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots(3)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{junta}})^2 = \frac{\pi}{4} (4)^2 = 12.566 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = 12.566 (\text{pg}^2) * \left(9511.76 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6369.85 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 39,481.24 [\text{lb}] \dots(3')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_i + w_e - w_o \dots(4)$$

Donde la presión en la superficie es igual a 300 kg/cm² (4266 lb/pg²) por que se está represionando la T. P., y la presión hidrostática es la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería de producción ($\rho_{\text{fluido}} = 0.70 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de la junta de expansión (considerar que un tramo equivale a 10 metros).

$$P_{\text{hidrostatica}} = \frac{0.70 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5270 [m]}{10} * 14.22 = 5.245.7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo en (1):

$$P_i = 4266 + 5245.7 = 9.511.76 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión externa (P_o) a la altura de la junta de expansión es igual a la presión hidrostática que ejerce el fluido del espacio anular ($\rho_{\text{fluido}} = 0.85 \text{ gr/cm}^3$) a la profundidad de la junta de expansión.

$$P_o = \frac{0.85 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] * 5270 [m]}{10} * 14.22 = 6,369.85 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Considerando que la Presión interna (P_i) es mayor que la presión en el espacio anular (P_o), existe *buckling*.

Efecto de buckling

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} \dots (2)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

$$F = A_p (P_i - P_o) \dots (3)$$

Donde el área del empacador (A_p) es igual a:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{junta}})^2 = \frac{\pi}{4} (4)^2 = 12.566 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (3):

$$F = 12.566 (\text{pg}^2) * \left(9511.76 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] - 6369.85 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) = 39,481.24 [\text{lb}] \dots (3')$$

w: Peso de la tubería (lb/pie)

$$w = w_t + w_i - w_o \dots (4)$$

donde:

F: Fuerza ficticia (lb)

w: Peso de la tubería (lb/pie)

ε : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

r: Claro radial (pg²)

$$r = \frac{D_{IntTR} - d_{ExtTP}}{2} = \frac{6.625 - 3.5}{2} = 1.5625[\text{pg}]$$

I: Momento inercial

$$I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D^4 - d^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (3.5^4 - 2.99^4) = 3.4428[\text{pg}^4]$$

Sustituyendo en (5):

$$\Delta L = - \frac{(1.5625[\text{pg}])^2 * (39481.24[\text{lb}])^2}{8 \left(3 * 10^7 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \right) * (3.4428[\text{pg}^4]) * \left(7.794 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right] \right)} = -0.5909[\text{pies}]$$

El efecto de buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.5909 pies o 0.1801 metros.

Efecto de baloneo

Calculando el efecto de baloneo:

$$\Delta L = - \frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1 + 2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right) \quad \dots(6)$$

donde:

μ : Relación de Poisson ($\mu=0.3$)

L: Longitud de la T.P. (pg)

ε : Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg²)

$\Delta \rho_i$: Cambio de la densidad dentro de la tubería (lb/pg³)

R: Relación de diámetros

$$R = \frac{D}{d} = \frac{3.5(\text{pg})}{2.99(\text{pg})} = 1.17$$

$\Delta \rho_o$: Cambio de la densidad fuera de la tubería (gr/cm³)

ξ : Caída de presión en la tubería debido al flujo (lb/pg²)/pie

ΔP_i : Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg²)

ΔP_o : Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg²)

Tomando las siguientes Consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones Finales	Cambio de Condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i_1} = 1 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{i_2} = 0.70 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_i = -0.30$ $= -0.0108 \text{ (lb/pg}^3\text{)}$
Densidad en el E. Anular	$\rho_{o_1} = 0.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\rho_{o_2} = 0.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$	$\Delta \rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i_1} = 3,555 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{i_2} = 4,266 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_i = 711 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$
Presión en el espacio anular	$P_{o_1} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$P_{o_2} = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$	$\Delta P_o = 0 \text{ [lb/pg}^2\text{]}$

tal que:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta P_i - R^2 \Delta P_o}{R^2 - 1} \right)$$

Por lo que la ecuación (6) se reduce a:

$$\Delta L = -\frac{\mu L^2}{E} \left(\frac{\Delta \rho_i}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right)$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{(0.3)(207427.2[\text{pg}])^2}{3 \cdot 10^7} \left(\frac{-0.0108 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^3} \right]}{(1.17)^2 - 1} \right) - \frac{2 \cdot (0.3)(207427.2[\text{pg}])}{3 \cdot 10^7} \left(\frac{711}{(1.17)^2 - 1} \right) = 4.6(\text{pg})$$

El efecto de baloneo provoca un alargamiento del aparejo de 4.6 (pg) o 0.1168 metros.

Efecto de pistoneo

Calculando el efecto de pistoneo:

$$\Delta L = -\frac{LF_r}{\varepsilon A_s} \quad \dots(7)$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (metros)

ε : Módulo de Young $3 \times 10^7 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$

A_s : Área transversal de la tubería (pg^2)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Tal que:

D: Diámetro externo de la T.P. (pg)

d: Diámetro interno de la T.P. (pg)

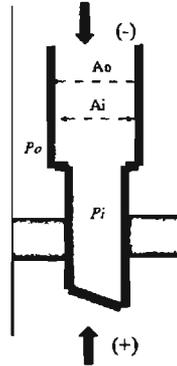
Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.99^2) = 2.59$$

F_r : Fuerza resultante (lb)

$$F_r = P_i(A_p - A_i) - P_o(A_p - A_o) \quad \dots(8)$$

donde:



$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{pistón}})^2 = \frac{\pi}{4} (4)^2 = 12.56 (\text{pg}^2)$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D)^2 = \frac{\pi}{4} (3.5)^2 = 9.621 (\text{pg}^2)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d)^2 = \frac{\pi}{4} (2.99)^2 = 7.02 (\text{pg}^2)$$

Sustituyendo en (8):

$$F_r = 9511.76(12.56 - 7.02) - 6369.85(12.56 - 9.621) = 33.974.16$$

Sustituyendo en (7):

$$\Delta L = - \frac{LF_r}{EA_s} = \frac{(5270) * 3.28 * (33974.16)}{(3 \times 10^7) * 2.59} = -7.55$$

$$\Delta L = -7.55 (\text{pies})$$

El efecto de pistoneo provoca un acortamiento del aparejo de 7.55 pies o 2.30 metros.

Efecto de temperatura

Calculando el efecto de temperatura:

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{\beta L}{2} (T_{s2} - T_{s1}) \quad \dots(1)$$

donde:

β : Coeficiente de expansión térmica $69 \times 10^{-7} (\text{°F}^{-1})$
 L: Longitud de la T. P. (metros)
 T_{s2} : Temperatura superficial después del cierre (°F)
 T_{s1} : Temperatura superficial antes del cierre (°F)

La temperatura después del cierre es de 70°C (158°F) y se supone una temperatura superficial antes del cierre de 28°C (82.4°F).

Sustituyendo en (1):

$$\Delta L_{\text{Temperatura}} = \frac{(69 \times 10^{-7} * 5270)}{2} (158 - 82.4) = 1.33 \text{ (metros)}$$

El efecto de temperatura provoca un acortamiento de la tubería de 1.33 metros.

Calculando el cambio de longitud total del aparejo cuando se cerró

$$\Delta L_{\text{Total}} = \Delta L_{\text{BUCKLING}} + \Delta L_{\text{PISTON}} + \Delta L_{\text{BALONEO}} + \Delta L_{\text{TEMPERATURA}}$$

Sustituyendo:

$$\Delta L_{\text{Total}} = -0.18 + 0.1168 - 2.30 + 1.33 = -1.0332 \text{ (metros)}$$

El cambio de longitud total debida a los tres efectos es un acortamiento de 1.0332 metros.

Calculando la fuerza resultante sobre la tubería:

$$F = \frac{\frac{L}{\epsilon A_s} \pm \left(\frac{L}{\epsilon A_s} \right)^2 - \frac{r^2 \Delta L}{2 \epsilon I w}}{\frac{r^2}{4 \epsilon I w}}$$

donde:

L: Longitud de la T.P. (pg)
 ϵ : Módulo de Young $3 \times 10^7 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$
 r: Radio de la T.P. (pg)
 w: Peso de la tubería (lb/pg)
 ΔL : Cambio de longitud total (pg)
 I: Momento inercial (pg^4)

Sustituyendo:

$$F = \frac{\frac{207427.2}{3 \times 10^7 (2.59)} \pm \left(\frac{207427.2}{3 \times 10^7 (2.59)} \right)^2 - \frac{(1.5625)^2 (-1.0332)}{2 (3 \times 10^7) (3.4428) (0.6508)}}{\frac{(1.5625)^2}{4 (3 \times 10^7) (3.4428) (0.6508)}} = -598,459.84 \text{ (lb)}$$

La fuerza resultante cuando se cierra el pozo es de -598.459.84 (lb).

Calculando el esfuerzo axial a la altura del cabezal (A):

$$\sigma_{\text{ax}} = \frac{W_{FR}}{A_s} \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \dots (1)$$

donde:

W_{TP} : Peso de la TP (lb)

$$W_{TP} = F - W_{TP27/8}$$

F: Fuerza resultante (lb)

A_s : Área transversal (pg)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \text{ (pg)}$$

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

Calculando el área transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi}{4} (3.5^2 - 2.99^2) = 2.5995$$

Sustituyendo en (1):

$$\sigma_{ZA} = \frac{-598459.84 - (9.2 * 5270 * 3.28)}{2.5995} = -291,397.33 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la altura del cabezal (σ_A):

$$\sigma_T = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2} \dots (2)$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (P_o - P_i)$$

P_o : Presión externa en el punto A (lb/pg²)

P_i : Presión interna en el punto A (lb/pg²)

Sustituyendo:

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (6369.85 - 9511.76) = -2,720.97 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right)^2}{\left(\frac{D}{t} \right) - 1} \right]$$

D: Diámetro externo (pg)

d: Diámetro interno (pg)

t: Espesor (pg)

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{3.5 - 2.99}{2} = 0.255 \text{ (pg)}$$

Sustituyendo:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{3.5}{0.255} \right)^2}{\left(\frac{3.5}{0.255} \right) - 1} \right] = 7.4020 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

donde:

$$f_3 = \sigma_z - \left[\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right]$$

r_i : Radio interno (1.495 pg)

r_o : Radio externo (1.75 pg)

P_i : Presión interna (lb/pg²)

P_o : Presión externa (lb/pg²)

$$f_3 = -291397.33 - \left[\frac{(1.495)^2 * 4266 - (1.75)^2 * 0}{(1.75)^2 - (1.495)^2} \right] = 302,919.87 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo f_1 , f_2 y f_3 en (2):

$$\sigma_r = \sqrt{[(3694.46)(7.4020)]^2 + (302919.87)^2} = 304,151.72 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Como el esfuerzo axial en el punto A es mayor que el punto de cedencia de la tubería, ésta no resiste el cierre del pozo en el cabezal.

Calculando el esfuerzo axial a la altura del empacador (B):

Sustituyendo en (1):

$$\sigma_{zB} = \frac{598459.84}{2.5995} = 230,221.13 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la altura del empacador (σ_3):

$$\sigma_r = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2} \dots (2)$$

La presión externa se calculo en el ejercicio N° 3.

Sustituyendo:

$$f_1 = \left(\frac{3}{2} \right) (6114.6 - 0) = 5,295.39 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo:

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{3.5}{0.255} \right)^2}{\left(\frac{3.5}{0.255} \right) - 1} \right] = 7.4020 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

$$f_3 = 230,221.13 - \left[\frac{(1.495)^2 * 9511.76 - (1.75)^2 (6369.85)}{(1.75)^2 - (1.495)^2} \right] = 228,104.62 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Sustituyendo f_1 , f_2 y f_3 en (2):

$$\sigma_{TB} = \sqrt{(-3694.46 * 7.4020)^2 + (228104.62)^2} = 229,737.98 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Como el esfuerzo axial en el punto B es mayor que el punto de cedencia de la tubería, ésta no resiste el cierre del pozo a la altura del empacador.

1. Diseño del Aparejo de Producción

El aparejo de producción debe ser analizado cuando está sujeto a diferentes esfuerzos durante su vida productiva como son tensión, compresión, presión interna y presión externa.

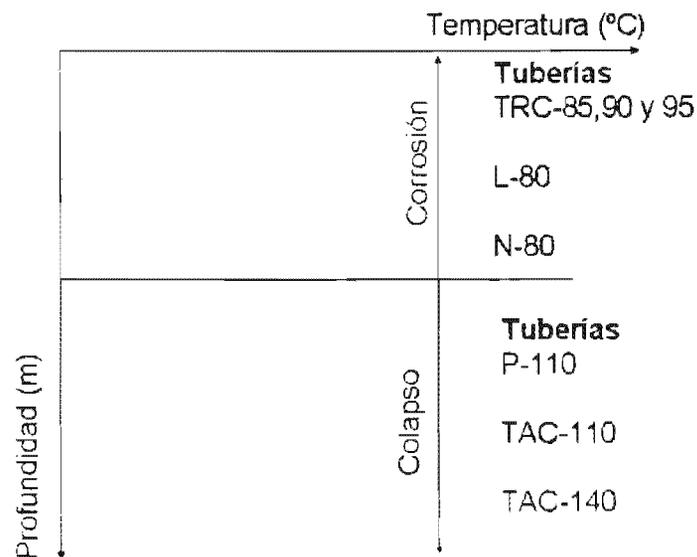
Al estar sometida una tubería a tensión o a compresión cambian sus dimensiones y estos cambios modifican los valores de resistencia al colapso y a la presión interna. Por lo tanto es conveniente evaluar esta reducción de resistencia de las tuberías.

El diseño del aparejo de producción involucra distintos aspectos, como son el diseño por corrosión, por presión interna y por presión de colapso. A continuación se presenta el procedimiento para el diseño del aparejo.

Paso 1

Calcular el gradiente de temperatura desde la superficie hasta el fondo del pozo.

Realizar una gráfica de profundidad vs temperatura para determinar de acuerdo a la norma NACE la profundidad de asentamiento de las T. P.'s resistentes a la corrosión y resistentes al colapso.



Determinar el tipo de tubería considerando su precio.

Pase 2

Determinar la resistencia de las tuberías a cargas máximas, es decir, considerando la peor condición posible de operación a la cual pueda estar sometida la T. P.

Paso 3

Calcular la resistencia a la tensión cuando la T. P. este colgando en el aire.

Paso 4

Calcular la tensión mínima necesaria para que cada una de las tuberías seleccionadas falle y corregirlas con sus respectivos factores de seguridad (1.4, 1.6 y 1.8).

Paso 5

Determinar si el aparejo resiste graficando estos valores contra la tensión a carga máxima.

Paso 6

Calcular la resistencia a la presión de colapso cuando la T. P. se queda vacía.

Paso 7

Calcular la presión de colapso mínima necesaria para que cada una de las tuberías seleccionadas falle y ajustarla con el siguiente procedimiento:

a) Calcular el parámetro X:

$$X = \frac{L_{\text{seccion}} * w}{Y_x * A_s}$$

donde:

L: Longitud de la tubería (pie)

w: Peso de la tubería por unidad de longitud (lb/pie)

Y_x : Esfuerzo de cedencia (lb/pg²)

A_s : Área transversal (pg²)

b) Calcular el valor de Y:

$$Y = \sqrt{1 - 0.75 * X^2} - 0.5 * X$$

c) Con el valor de Y, obtener el valor corregido de la presión de colapso:

Presión de colapso corregida:

$$P_{cc} = \frac{P_c * Y_x}{F_{sc}}$$

Donde el factor de seguridad para la presión de colapso (F_{sc}) es de 1.125.

Obtener el valor de presión de colapso corregida a cada profundidad y en una grafica profundidad vs presión graficar estos valores contra la presión de colapso a carga máxima y determinar si el aparejo resiste.

Paso 8

Calcular la resistencia a la presión interna cuando se está fracturando la formación o cuando se cierra el pozo.

Paso 9

Calcular la presión interna mínima antes de que las tuberías seleccionadas fallen y ajustarla con el siguiente procedimiento:

a) Calcular el parámetro X :

$$X = \frac{L_{section} * w}{Y_c * A_s}$$

donde:

L : Longitud de la tubería (pie)

w : Peso de la tubería por unidad de longitud (lb/pie)

Y_c : Esfuerzo de cedencia (lb/pg²)

A_s : Área transversal (pg²)

b) Calcular el valor de Y :

$$Y = \sqrt{1 - 0.75 * X^2} - 0.5 * X$$

c) Con el valor de Y , obtener el valor corregido de la presión interna:

Presión interna corregida:

$$P_{ic} = \frac{P_i * Y}{F_{SI}}$$

Donde el factor de seguridad para la presión interna (F_{SI}) es de 1.250.

Obtener el valor de presión interna corregida a cada profundidad y en una grafica profundidad vs presión graficar estos valores contra la presión interna a carga máxima.

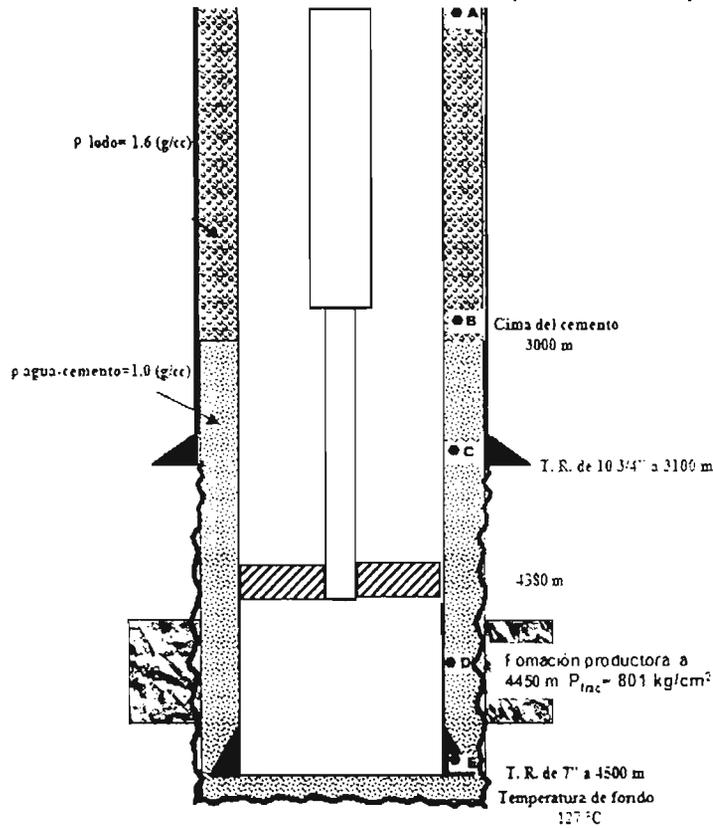
Ejercicio N° 1

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" TRC-95 35(lb/pie) (d=6.004") de 0 a 1500 m, una de 7" N-80 38 (lb/pie) (d=5.992") de 1500 a 3000 m y una de 7" P-110 35 (lb/pie) (d=6.004") de 3000 a 4500 m. La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000 m. la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x 7" 10M: para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T. R. intermedia de 10 3/4" N-80 51 (lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm³), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm³). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m.

Diseñar a cargas máximas un aparejo combinado para diámetros de 2 7/8" y 2 3/8" considerando la mejor opción técnico-económico, considerar 2200 m de tubería de 2 7/8" , el aparejo será introducido en seno de agua dulce, la profundidad de anclaje del empacador será 70 metros arriba del intervalo a probar.

Presente las graficas de diseño a la tensión, colapso y presión interna.

Cabezal 10 3/4" 5M x 7" 10M (Ts=28 ° C)



Tubería disponible a considerar

Considere que un tramo equivale a 12 m

Tipo de tubería	Tramos	Precio por metro de la tubería
Tubería de producción de 3 1/2" P-105 12.7#	100	9
Tubería de producción de 3 1/2" N-80 9.2#	200	8
Tubería de producción de 3 1/2" N-80 12.7#	100	9
Tubería de producción de 3 1/2" TRC-95 9.2#	200	10
Tubería de producción de 3 1/2" TRC-95 12.7#	200	11
Tubería de producción de 3 1/2" P-105 9.2#	100	8
Tubería de producción de 2 7/8" N-80 6.4#	100	3
Tubería de producción de 2 7/8" N-80 8.6#	200	4
Tubería de producción de 2 7/8" TRC-95 6.4#	100	6
Tubería de producción de 2 7/8" TRC-95 8.6#	200	7
Tubería de producción de 2 7/8" P-110 6.4#	200	4
Tubería de producción de 2 3/8" P-110 4.6#	200	2
Tubería de producción de 2 3/8" N-80 4.6#	200	1

Solución

Lo primero que se tiene que calcular para diseñar un aparejo de producción es el perfil de temperaturas para poder determinar la profundidad exacta donde tendremos problemas de H₂S (Sulfhídrico); según el API los mayores efectos de corrosión ocurren cuando la temperatura del pozo es de 65 °C, sin embargo como margen de seguridad vamos a considerar 75 ° C, con esto se debe determinar la profundidad mínima a la cual debe colocarse una T. P. resistente a la corrosión.

Si sabemos que la temperatura en superficie es de 28 ° C y que el gradiente de temperatura estático es de 0.0224 °C/m la temperatura del fondo se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_{Fondo} = T_{sup} + (L * 0.0224)$$

Sustituyendo:

$$T_{Fondo} = 28 + (4450 * 0.0224) = 127.68^{\circ}C$$

Entonces hacemos una gráfica Profundidad vs Temperatura (Fig. 1), y con la temperatura de 75 °C interceptamos el gradiente de Temperatura y obtenemos la profundidad máxima en donde vamos a asentar la tubería resistente a la corrosión.

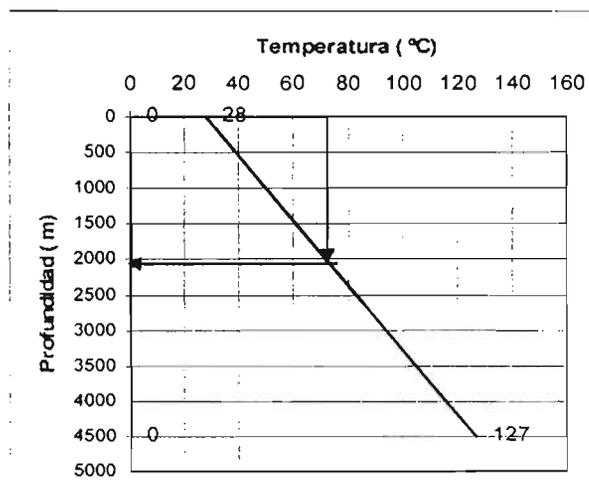


Fig. 1

De acuerdo a la gráfica la tubería resistente a la corrosión debe colocarse a 2200 m.

Considerando las tuberías que son resistentes a la corrosión y el precio de cada una el arreglo es el siguiente:

- 0 a 2200 metros T. P. 2 7/8" (resistente a la corrosión)
- 2200 a 4380 m T. P. 2 3/8" (cima del empacador)

Lo siguiente es determinar la resistencia a la tensión. Como se está utilizando el procedimiento de cargas máximas, debemos diseñar considerando la peor condición posible de operación a la cual pueda estar sometida la T. P a la tensión, este caso es cuando está colgada en el aire.

Considerando una T. P. de 2 7/8" N-80 de 6.4 lb/pie con una longitud de 2200 m y el resto de TP de 2 3/8" P-110 de 4.6 lb/pie, tendremos un peso de:

$$W_{aire} = [W_{TR6.4} * (2200 - 0)m + W_{TR4.6} * (4380 - 2200)m] * 3.28 = 79,074.2(lb)$$

Calculando la tensión para la tubería N-80:

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (2.875^2 - 2.441^2) = 144,962.13[lb]$$

Calculando la tensión para la tubería P-110:

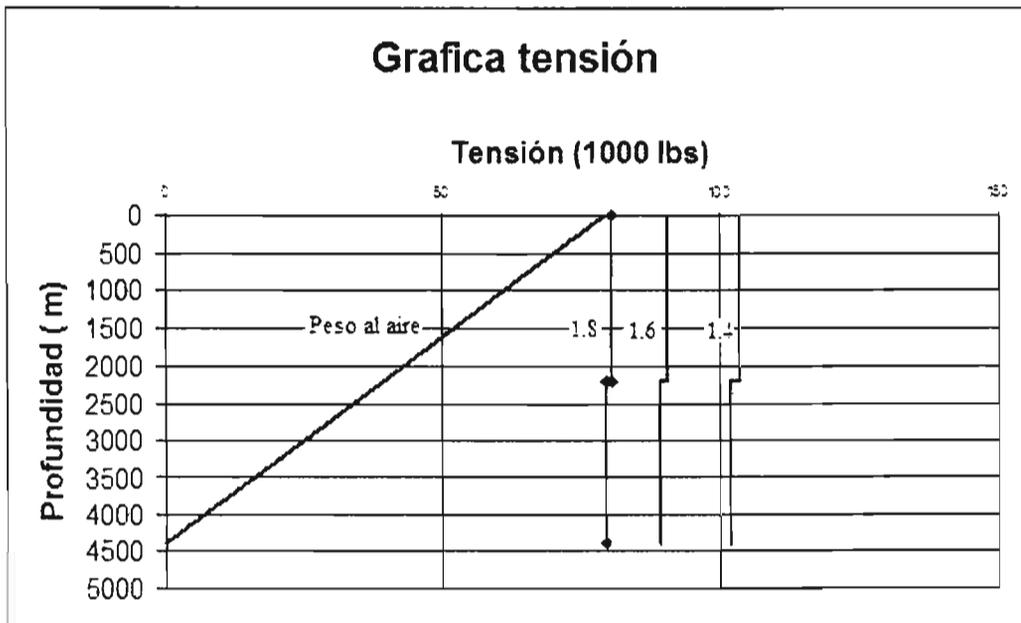
$$T = \frac{\pi}{4} * 110000 * (2.375^2 - 1.995^2) = 143,465.5[lb]$$

Estos valores de tensión se deben corregir con sus respectivos factores de seguridad (1.4, 1.6 y 1.8):

$$T_c = \frac{T / 1000}{F_s}$$

	1.8	1.6	1.4
Prof.	Tension	Tension	Tension
0	80.6	90.6	103.6
2200	80.6	90.6	103.6
2200	79.4	89.4	102.1
4380	79.4	89.4	102.1

Graficando estos valores:



Como se observa cuando aplicamos el factor de seguridad de 1.8 la resistencia de la tubería esta solo 1500 lb arriba de la carga máxima que calculamos cuando la tubería se encuentra colgada en el aire y como se debe tener un margen de seguridad del 40% del peso del aparejo, que en este caso es de 31.629.68 (lb) decidiremos utilizar otra T. P. del mismo diámetro pero que tenga un peso mayor, por ejemplo una N-80 de 8.6 lb/pie. o una TRC-95 de 6.4 lb/pie. pero considerando que esta ultima es 50% más cara. probaremos con la N-80 de 8.6 lb/pie.

Considerando la T. P. de 2 7/8" N-80 de 8.6 lb/pie con una longitud de 2200 m y el resto de TP de 2 3/8" P-110 de 4.6 lb/pie. tendremos un peso de:

$$W_{tubo} = [W_{TP8.6} * (2200 - 0)m + W_{TP4.6} * (4380 - 2200)m] * 3.28 = 94.949.44(lb)$$

Calculando la tensión para la tubería N-80:

$$T = \frac{\pi}{4} * 80000 * (2.875^2 - 2.259^2) = 144,962.13[lb]$$

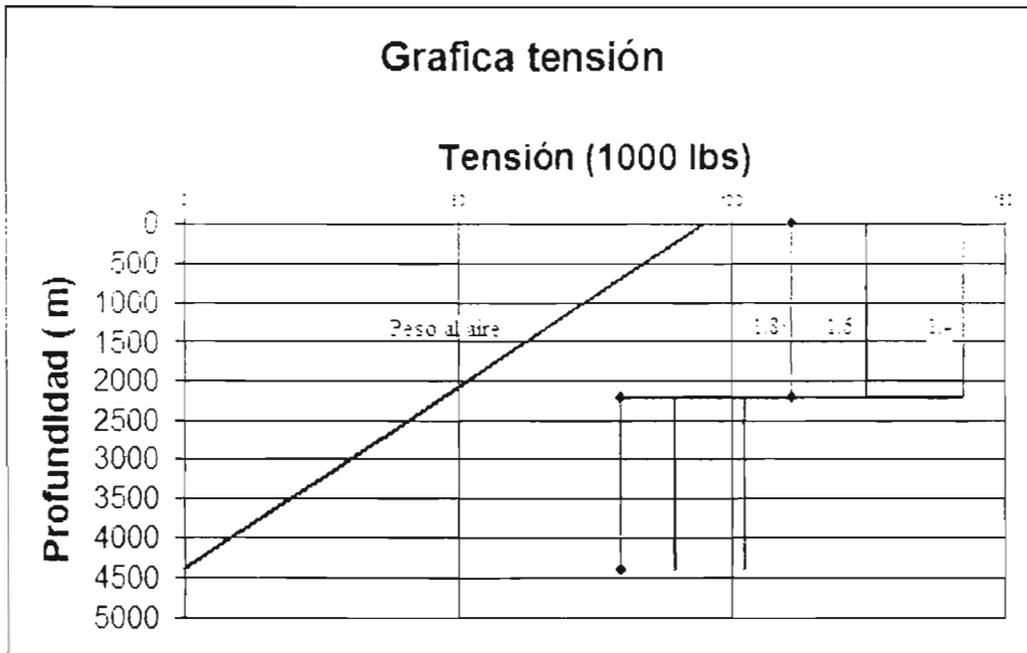
Calculando la tensión para la tubería P-110:

$$T = \frac{\pi}{4} * 110000 * (2.375^2 - 1.995^2) = 143,465.5[lb]$$

Estos valores de tensión se deben corregir con sus respectivos factores de seguridad (1.4, 1.6 y 1.8):

$$T_c = \frac{T / 1000}{F_s}$$

	1.8	1.6	1.4
Prof.	Tension	Tension	Tension
0	110.6	124.4	142.1
2200	110.6	124.4	142.1
2200	79.4	89.4	102.1
4380	79.4	89.4	102.1



Como se observa cuando aplicamos el factor de seguridad de 1.8 la resistencia de la tubería esta solo 15.700 lb arriba de la carga máxima que calculamos cuando la tubería se encuentra colgada en el aire y como se debe tener un margen de seguridad del 40% del peso del aparejo que en este caso es de 37.979.7 (lb) decidiremos utilizar otra T. P. del mismo diámetro pero que tenga un peso mayor, como una TRC-95 de 8.6 lb/pie. aunque esta sea un 75% más cara:

Considerando la T. P. de 2 7/8" TRC-95 de 8.6 lb/pie con una longitud de 2200 m y el resto de TP de 2 3/8" P-110 de 4.6 lb/pie. tendremos un peso de:

$$W_{total} = [W_{TRC-95} * (2200 - 0)m + W_{P-110} * (4380 - 2200)m] * 3.28 = 94,949.44(lb)$$

Calculando la tensión para la tubería N-80:

$$T = \frac{\pi}{4} * 95000 * (2.875^2 - 2.259^2) = 235,966.3[lb]$$

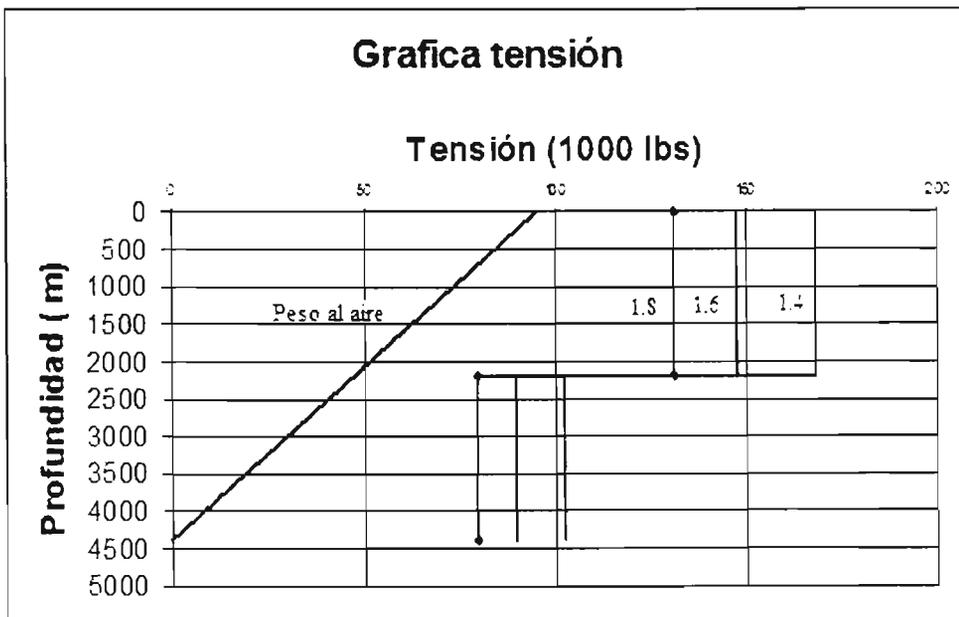
Calculando la tensión para la tubería P-110:

$$T = \frac{\pi}{4} * 110000 * (2.375^2 - 1.995^2) = 143,465.5[lb]$$

Estos valores de tensión se deben corregir con sus respectivos factores de seguridad (1.4, 1.6 y 1.8):

$$T_c = \frac{T/1000}{F_s}$$

	1.8	1.6	1.4
Prof.	Tension	Tension	Tension
0	131.1	147.5	168.6
2200	131.1	147.5	168.6
2200	79.4	89.4	102.1
4380	79.4	89.4	102.1



Como se observa cuando aplicamos el factor de seguridad de 1.8 la resistencia de la tubería esta 37000 lb arriba de la carga máxima que calculamos cuando la tubería se encuentra colgada en el aire, que es mas del 40% del peso asi que este arreglo si cumple para la tensión y los siguientes cálculos serán hechos para un aparejo combinado de 2 7/8" TRC-95. 8.6 lb/pie de 0 a 2200 m y de 2200 m a 4380 m será una T. P. de 2 3/8" P-110. 4.6 lb/pie.

El siguiente paso es calcular si estas tuberías seleccionadas resisten la presión de colapso y la presión interna.

Para determinar la resistencia a la presión al colapso se debe diseñar el aparejo considerando la peor condición posible de operación a la cual pueda estar sometida la T. P. al colapso. Este caso ocurre cuando la T. P. se queda vacía.

Calculando la presión hidrostática que ejerce el fluido en el espacio anular (1.0 g/cm³) a la altura del empacador:

$$P_o = \frac{1.0(4380)}{10} * 14.22 = 6228.36 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la presión de colapso para la tubería TRC-95:

Calculando el rango de esbeltez (r) para determinar la fórmula a utilizar de acuerdo al tipo de colapso:

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) \quad \dots(1)$$

Calculando el espesor (pg):

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{2.875 - 2.259}{2} = 0.308(pg)$$

Sustituyendo en (1):

$$r = \left(\frac{D}{t} \right) = \left(\frac{2.875}{0.308} \right) = 9.33$$

Considerando la tubería TRC-95 cuyo rango calculado es de 9.33 es *colapso de cedencia*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso de cedencia* mínima es:

$$P_{C_{cedencia}} = 2Y_x \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right) - 1}{\left(\frac{D}{t} \right)^2} \right]$$

Sustituyendo:

$$P_C = 2 * 95000 * \left[\frac{9.33 - 1}{(9.33)^2} \right] = 18.181.7 \left(\frac{lb}{pg^2} \right)$$

La presión de colapso de una tubería de grado TRC-95 2 7/8" es de 18.181.7 (lb/pg²).

Calculando la presión de colapso para la tubería P-110:

Calculando el espesor (pg):

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{2.375-1.995}{2} = 0.19(\text{pg})$$

Sustituyendo en (1):

$$r = \left(\frac{D}{t}\right) = \left(\frac{2.375}{0.19}\right) = 12.5$$

Considerando la tubería P-110 cuyo rango calculado es de 12.5 es *colapso de cedencia*.

La fórmula para calcular la presión de *colapso de cedencia* mínima es:

$$P_{C_{cedencia}} = 2Y_x \left[\frac{\left(\frac{D}{t}\right) - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right]$$

Sustituyendo:

$$P_c = 2 * 110000 * \left[\frac{12.5-1}{(12.5)^2} \right] = 16,192 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right)$$

La presión de colapso de una tubería de grado P-110 2 3/8" es de 16,192 (lb/pg²).

Calcularemos Y:

$$X = \frac{L_{sección}(\text{pie}) * w \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}} \right)}{Yp \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) * As(\text{pg}^2)} = \frac{\frac{2180}{0.3048} \text{ pie} * 4.6 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right)}{110000 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) * 1.30(\text{pg}^2)} = 0.229$$

Calcularemos el colapso corregido @ 2200 m en la sección de 2 3/8" P-110:

$$P_{C_{corregido}} = \frac{P_c * Y}{F_s_{colapso}} \quad \dots(2)$$

donde:

$$Y = \left(\sqrt{1 - 0.75 * X^2} \right) - 0.5 * X = \left(\sqrt{1 - 0.75 * 0.229^2} \right) - 0.5 * 0.229 = 0.872$$

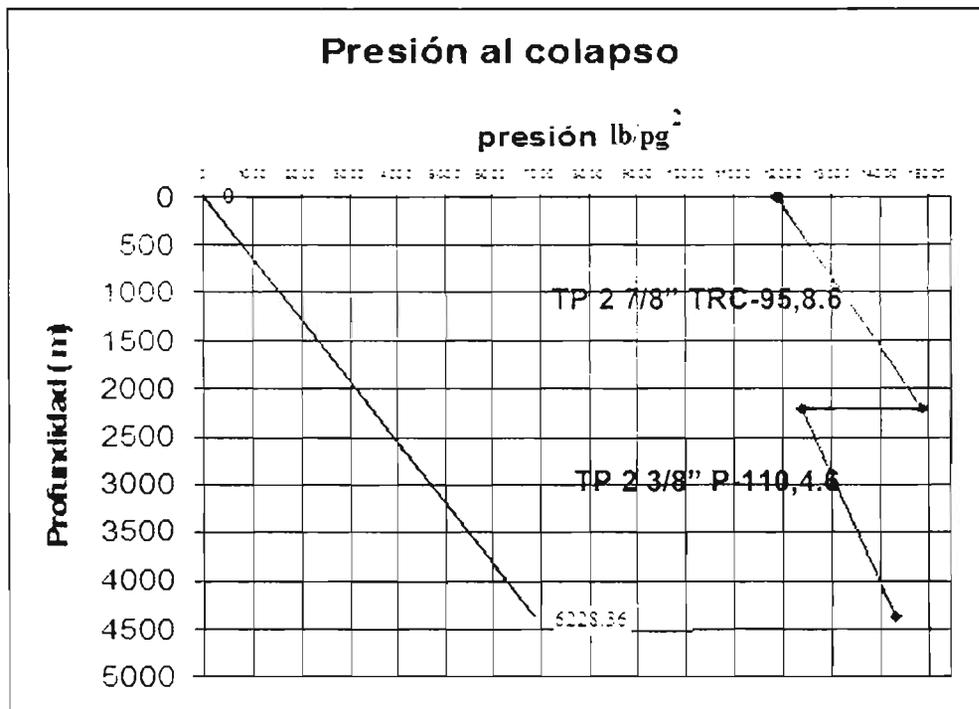
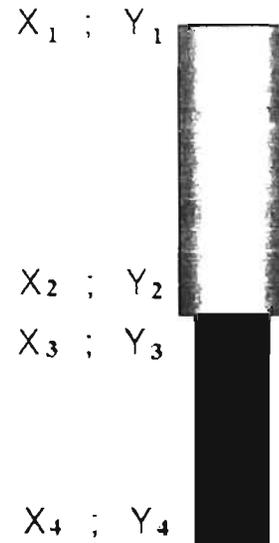
Sustituyendo en (2):

$$P_{c\text{ corregido}} = \frac{P_{c\text{ tablas}} * Y}{F_{s\text{ colapso}}} = \frac{16192 * 0.872}{1.125} = 12550.5 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Utilizando el mismo método se construyeron las siguientes tablas y la gráfica:

Calculos de los valores de X y de Y (colapso)			
a 4380 m X1=	0	Y1=	1.000
a 2200 m X2=	0.229	Y2=	0.865
a 2200 m X3=	0.139	Y3=	0.923
a superficie X4=	0.402	Y4=	0.736

Valores al colapso corregidos	
sección	presión(lb/pg ²)
Pc1=	11,887.9
Pc2=	14,907
Pc3=	12,550.5
Pc4=	14,337.8



Como se puede observar en la gráfica a la presión de colapso, estas tuberías seleccionadas si cumplen el diseño a presión externa. así que procederemos a calcular si cumple por presión interna.

La resistencia a la presión Interna se calcula considerando la peor condición posible de operación a la cual pueda estar sometida la T. P. a la presión interna, y en este caso es cuando estamos realizando una estimulación o un fracturamiento a la formación; así que procederemos a calcular la presión máxima en superficie a la que estará sometida la T. P. Esto se logra restándole a la presión de fractura (801 kg/cm² es decir 11,390.22 (lb/pg²)) la presión hidrostática que ejerce el fluido en dentro de la tubería (agua dulce de 1.0 g/cm³) que es de 6,228.36 (lb/pg²) por lo que la presión en superficie necesaria para fracturar será:

$$P_{\text{superficie}} = P_{\text{fractura}} - P_{\text{hidrostática}}$$

$$P_{\text{superficie}} = 11390.22 - 6228.36 = 5161.86 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

Calculando la presión equivalente a la altura del empacador:

$$P_{e_A} = \frac{P_{O_A} D - P_{i_A} d}{D}$$

La presión externa (P_o), es la presión hidrostática a la altura del empacador:

$$P_o = \frac{1.0(4380)}{10} * 14.22 = 6228.36 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

Sustituyendo:

$$P_e = \frac{(6228.36 * 2.375) - (5161.86 * 1.995)}{2.375} = 1,892.39 \text{ (Lb/pg}^2\text{)}$$

Calculando la presión interna para la tubería P-110:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_s t}{D} \right) \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right] \quad \dots(2)$$

Sustituyendo:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 110000 * 0.19}{2.375} \right) = 15,400 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La presión interna de una tubería de grado P-110 2 3/8" es de 15,400 (lb/pg²).

Calcularemos X:

$$X = - \frac{L_{\text{sección}}(ft) * w \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right)}{Yp \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) * As(\text{pg}^2)} = \frac{2180}{0.3048} \text{ ft} * 4.6 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right)}{110000 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) * 1.30(\text{pg}^2)} = -0.229$$

Calcularemos la presión interna corregida @ 2200 m en la sección de 2 3/8" P-110:

$$P_{ic} = \frac{P_{i(tablas)} * Y}{F_{sc}}$$

donde:

$$Y = \left(\sqrt{1 - 0.75 * X^2} \right) - 0.5 * X = \left(\sqrt{1 - 0.75 * (-0.229)^2} \right) - 0.5 * (-0.229) = 1.095$$

Sustituyendo en (2):

$$P_{i\text{ corregida}} = \frac{P_i * Y}{F_{s\text{ interna}}} = \frac{15400 * 1.095}{1.25} = 13487.2 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

Utilizando el mismo método se construyeron las siguientes tablas y la gráfica

Calculos de los valores de X y de Y (Pinterna)			
X1=	0	Y1=	1
X2=	-0.229	Y2=	1.095
X3=	-0.139	Y3=	1.062
X4=	-0.402	Y4=	1.139

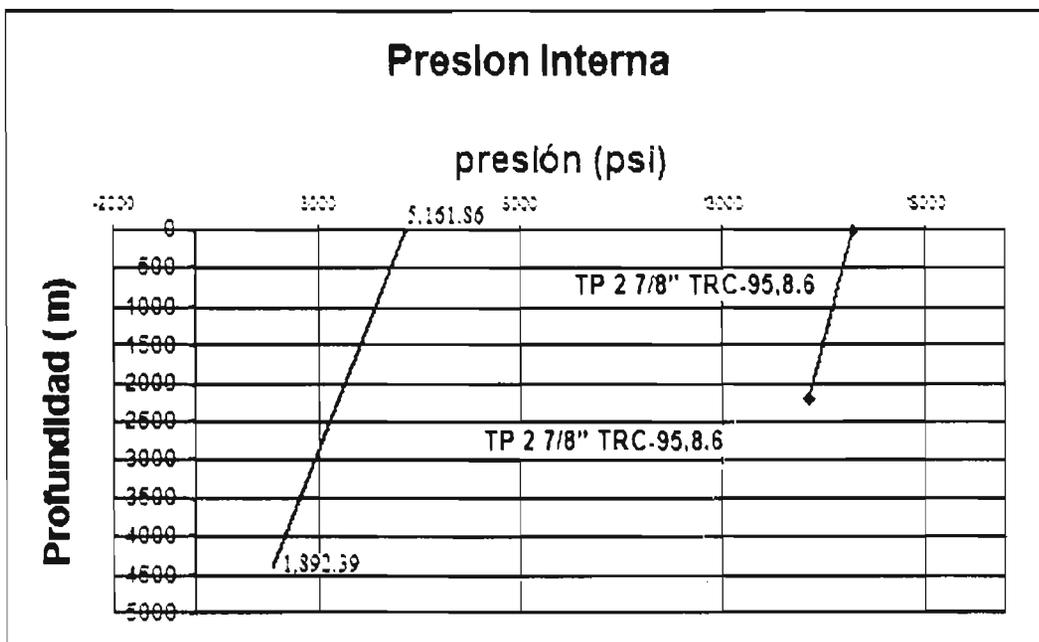
PROFUNDIDAD (m)	PRESIÓN INTERNA CORREGIDA (lb/pg ²)
0	16,221.8
2200	15,137
2200	13,487.2
4380	12,320

X₁ ; Y₁

X₂ ; Y₂

X₃ ; Y₃

X₄ ; Y₄



Como se puede observar en la gráfica a la presión interna, estas tuberías seleccionadas si cumplen el diseño a presión interna.

Por lo tanto después de haber realizado el calculo para determinar si el aparejo resiste la tensión la presión de colapso y la presión interna a cargas máximas se decide que el aparejo de producción a utilizar es un aparejo combinado que consta de una sección de T. P. de 2 7/8" TRC-95 8.6 lb/pie de 0- 2200 m y una T. P. de 2 3/8" P-110, 4.6 lb/pie de 2200- 4380 m.

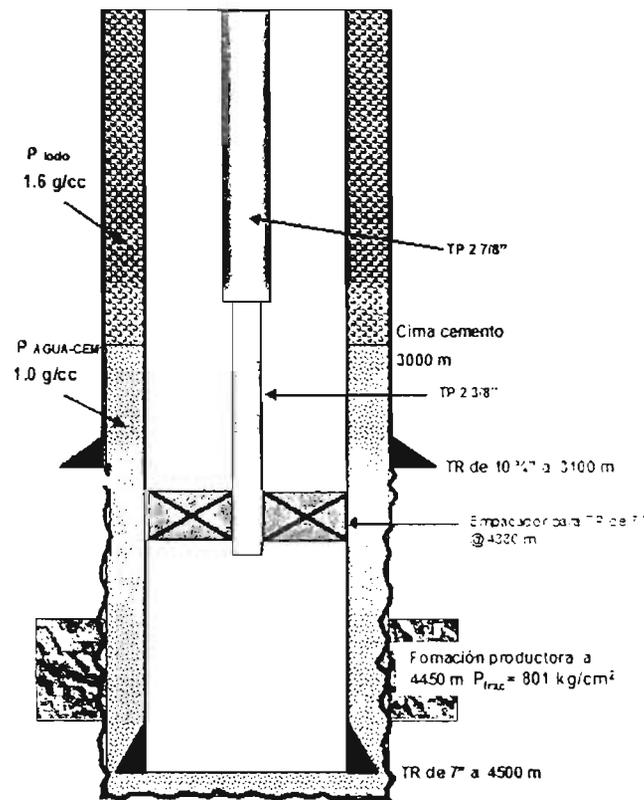
4. Ejercicios propuestos

Ejercicio N° 1

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" N-80 de 26(lb/pie) de 0 a 1000 m. de 1000 m a 3000 m una 7" N-80 de 23(lb/pie) y de 3000 a 4500 m una 7" N-80 de 26(lb/pie). La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000m. la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10 3/4" 5M x7"10M para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 m con respecto a la T.R. intermedia de 10 3/4" N-80 de 51(lb/pie). La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 (gr/cm³), utilizando barrena de 8 3/4" y en la etapa de 10 3/4" se utilizó fluido de 1.3 (gr/cm³). El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 m. La presión de fractura de la formación a 4450 m es de 801 (kg/cm²).

Considerar un aparejo de producción combinado de 2 7/8" TRC-95 8.6 (lb/pie) de 0 a 2200 metros y una T. P. de 2 3/8" P-110 4.6 (lb/pie) de 2200 a 4380, con empacador (d=1.9") anclado a 4380 metros.

En el caso de que **no se permita** el libre movimiento del aparejo de producción, esto es que el acortamiento o elongación lo absorba la tubería, determinar la fuerza resultante.



Ejercicio N° 2

Continuando con el ejercicio anterior y considerando que el aparejo permite el libre movimiento y que durante el ajuste se le colocaron 3 toneladas sobre el empacador, determinar la longitud de sellos del empacador.

Ejercicio N° 3

Determinar la fuerza resultante sobre la tubería de 3 ½" P-110 12.7 (lb/pie) ($d=2.750''$), considerando que el espacio anular se encuentra lleno de agua y se represionó de cero a 4000 (lb/pg²). Además se puso a producir aceite de 0.85 (gr/cm³), anteriormente estaba lleno de agua dulce, la temperatura del intervalo productor es de 120 ° C y la superficial de 30 ° C. Considerar un empacador que no permite el libre movimiento de 7 5/8" ($d=4''$), anclado a 3100 metros, el empacador es paa T. R. de 9 5/8" N-80 29 (lb/pie) ($d=6.875''$).

Ejercicio N° 4

Continuando con el ejercicio N° 3, considerar que el sistema se diseñara con libre movilidad de sellos, determinar la longitud de sellos del empacador.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

En este trabajo de tesis se logran recopilar una serie de ejercicios relacionados con la determinación de las fuerzas aplicadas y sus efectos en las tuberías de explotación y Producción, así como algunos ejemplos en los que interviene el diseño del aparejo de producción.

Como se menciona en el Capítulo Uno es de suma importancia conocer el esfuerzo mínimo necesario para provocar una falla en la tubería debido a los efectos de la tensión, la presión interna o la presión de colapso, este esfuerzo depende del grado o esfuerzo de cedencia de cada tubería. También se tendrá que evaluar la resistencia de la tubería ante la imposición de una combinación de esfuerzos provocados por las operaciones que se estén realizando en el pozo o por el efecto de la densidad de los fluidos, teniendo que determinar el esfuerzo triaxial y la elipse de esfuerzos triaxiales para determinar si la tubería resistirá ante estas condiciones.

Con relación al cambio de longitud del aparejo de producción mencionado en el Capítulo Dos se debe considerar el tipo de operación que se este realizando en el pozo, que por lo general son inducciones para producción, fracturamientos de la formación, disparos en la formación o en la propia producción del pozo, ya que estas operaciones pueden producir el efecto de pistoneo, el efecto de baloneo o el efecto buckling los cuales provocan un acortamiento o elongación en el aparejo.

El cambio en las condiciones térmicas de la tubería debido al efecto de flujo de fluidos dentro del pozo merece especial atención, lo cual se menciona a detalle en el Capítulo Tres, ya que junto con los efectos vistos en el Capítulo Dos se provocara un gran cambio en la longitud de las tuberías o del aparejo de producción.

Los empacadores juegan un papel muy importante en el diseño del aparejo de producción ya que los efectos sobre la tubería están en relación al libre movimiento del aparejo o la restricción del mismo.

El diseño del aparejo a cargas máximas de acuerdo al procedimiento descrito en el Capítulo Cuatro nos permitirá diseñar la tubería de producción considerando las posibles operaciones que se realicen en el pozo.

El análisis detallado de los esfuerzos a los que estará sometida la tubería nos permitirá determinar la mejor opción de diseño del pozo tratando siempre, de economizar los recursos financieros y de maximizar los recursos materiales con los que se cuenten. Para esto es importante considerar la mayor cantidad de información que se tenga sobre el yacimiento proveniente de estudios o de información recabada de pozos vecinos con el propósito de anticiparnos a las posibles operaciones que se vayan a realizar o la producción estimada del yacimiento.

Recomendaciones

Es necesario tener claros los conceptos generales sobre las tuberías y sus propiedades. es decir, saber diferenciar entre una tubería de revestimiento (T. R.) y una tubería de producción (T. P.). También es necesario manejar los conceptos como lo son: el grado de la tubería, el peso por unidad de longitud y el esfuerzo de cedencia, todo esto para no tener problemas al utilizar las ecuaciones.

En el Capítulo Uno debemos considerar que al evaluar el esfuerzo de tensión, la presión interna y la presión de colapso, se calcula el valor mínimo necesario para que la tubería presente una falla ante la imposición de alguno de estos esfuerzos, es decir, si durante alguna operación se sobrepasa el valor considerado la tubería fallará.

En el Capítulo Dos es necesario tener bien definidos los conceptos sobre el efecto de pistoneo, el efecto de baloneo y el efecto buckling para poder deducir si la tubería se encogerá o se elongará incluso antes de hacer el cálculo, teniendo conocimiento de la operación que se está realizando.

En el capítulo 3 es necesario determinar el perfil de temperaturas de acuerdo a la temperatura superficial inicial y final además de la temperatura de fondo que se tenga. cuando se carezca de alguno de estos datos se tendrán que calcular de acuerdo a las condiciones que presente el pozo o en caso extremo de acuerdo a la experiencia de un profesional en el área suponerlo.

En el capítulo 4 es necesario determinar si el empacador permite el libre movimiento del aparejo o si tiene movimiento limitado, ya que de esto dependerán los cálculos para determinar su diseño. En el caso del diseño del aparejo por cargas máximas se considera el diámetro interno de la T. R. para a partir de esto determinar el diámetro externo de la T. P. y su grado, considerando el costo por tramo de la tubería y la temperatura a la cual se tendrán problemas por efecto del ácido sulfhídrico.

Bibliografía

Fuentes de información bibliográfica

1. Neal J., Adams, Drilling Engineering: a complete well planning approach. 1ª E. D. Penn Well Books. 1985.
2. Benitez Hernández, Miguel A., Apuntes de Tecnología de Perforación (primera parte), Facultad de Ingeniería (UNAM), caja 174.
3. Economides, Michael J., Petroleum Well Construction, Great Britain, John Wiley & Sons. 1998.
4. Apuntes del curso de Terminación y Reparación de Pozos impartido por el Ingeniero Martín Terrazas Romero, semestre 2004-2.
5. Buorgoyne Jr., Adam T., et al, Applied Drilling Engineering, 2ª ED., E.U.A.,SPE. 1991.
6. Unidad de perforación y mantenimiento de pozos, Un siglo de la perforación en México, PEMEX Exploración y Producción, 2000.
7. Mouchet, J., et al, Abnormal Pressures while drilling, Elf Aquitaine, Manuels, 1989.
8. Perschard, Eugenio, Resistencia de Materiales, volumen I, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1992.
9. Garaicochea P, Francisco, et al, Apuntes de Terminación de Pozos, Facultad de Ingeniería (UNAM), caja 183.

Nomenclatura y Conversiones

NOMENCLATURA

A continuación se presenta una relación de los símbolos sus significados y unidades que se usaron en el desarrollo de las ecuaciones presentadas en este curso.

SÍMBOLOS

A_s :	Área transversal (pg)
A_p :	Área del interior del empacador (pg)
A_i :	Área del interior de la T. P. (pg ²)
A_o :	Área del exterior de la T. P. (pg ²)
D :	Diámetro externo de la tubería (pg)
d :	Diámetro interno de la tubería (pg)
ΔL :	Acortamiento de la tubería (pie, m)
ΔT :	Diferencial de temperatura (° F)
$\Delta \rho_i$:	Cambio de la densidad dentro de la tubería (gr/cm ³ , lb/pg ³)
$\Delta \rho_o$:	Cambio de la densidad fuera de la tubería (gr/cm ³ , lb/pg ³)
ΔP_i :	Caída de presión dentro de la tubería (lb/pg ²)
ΔP_o :	Caída de presión fuera de la tubería (lb/pg ²)
F_r :	Fuerza resultante (lb _{fuerza})
F_F :	Fuerza de flotación
h :	Altura (m, pie)
I :	Momento inercial (pg ⁴)
L :	Longitud de la Tubería (metro, pie)
n :	Punto neutro (pie, m)
P_e :	Presión equivalente (lb/pg ²)
P_o :	Presión externa (lb/pg ²)
P_i :	Presión interna (lb/pg ²)
ρ :	Densidad promedio del fluido (kg/m ³)
ρ_f :	Densidad del fluido (gr/cm ³)
σ_t :	Esfuerzo triaxial
σ_z :	Esfuerzo axial
σ_θ :	Esfuerzo Tangencial
σ_r :	Esfuerzo radial
R :	Relación de diámetros
r_i :	Radio interno (pg)
r_o :	Radio externo (pg)
r :	Claro radial (pg ²)
T :	Tensión (lb _{fuerza})
T_{s1} :	Temperatura superficial antes de la prueba (°F)
T_{s2} :	Temperatura superficial después de la prueba (°F)
t :	Espesor (pg)
v :	volumen de la columna (lt)
w_i :	Peso unitario de la tubería (lb _{fuerza} /pie)
w_t :	Peso de la tubería por unidad de longitud (lb _{fuerza} /pie)
w_i :	Peso del fluido del interior de la tubería por unidad de longitud (lb _{fuerza} /pie)
w_o :	Peso del fluido del exterior de la tubería por unidad de longitud (lb _{fuerza} /pie)
ξ :	Caída de presión en la tubería debida al flujo (lb/pg ²)/pie
Y_c :	Esfuerzo de cedencia (lb/pg ²)

CONSTANTES

ρ_{acero} :	Densidad del acero 7.6 (gr/cm ³)
μ :	Relación de Poisson ($\mu=0.3$)
β :	Coefficiente de expansión térmica 69×10^{-7} (°F ⁻¹)
ϵ :	Módulo de Young 3×10^7 (lb/pg ²)

CONVERSIONES

1 (lb)=	453.5 (gr)
1 (m)=	3.28 (pies)
1 (pie) =	0.3048 (m)
1 (lb)=	0.453 (kg)
1 (bl)=	158.98 (lt)
1 (gr/cm ³)=	0.03612 (lb/pg ³)
1 (gr/cm ³)=	62.428 (lb/pie ³)
°F=	1.8 ° C + 32
°C=	5/9 (° F - 32)
°K=	° C + 273
°R=	°F + 460